

**EVALUACIÓN DE LA CONCENTRACIÓN DE MATERIAL PARTICULADO PM<sub>10</sub>  
EN LA REGIÓN NORTE – CENTRO HISTÓRICO DE LA CIUDAD DE  
BARRANQUILLA**

**CAMILA ANDREA BARRAZA VILLAREAL**

**LEIDY MARIA SANCHEZ QUINTERO**



**UNIVERSIDAD DE LA COSTA**

**DEPARTAMENTO DE CIVIL Y AMBIENTAL**

**PROGRAMA DE INGENIERÍA AMBIENTAL**

**BARRANQUILLA**

**2019**

**EVALUACIÓN DE LA CONCENTRACIÓN DE MATERIAL PARTICULADO PM<sub>10</sub>  
EN LA REGIÓN NORTE – CENTRO HISTÓRICO DE LA CIUDAD DE  
BARRANQUILLA.**

**LEIDY MARIA SANCHEZ QUINTERO**

**CAMILA ANDREA BARRAZA VILLAREAL**

**TRABAJO DE GRADO PRESENTADO COMO REQUISITO PARA OPTAR AL  
TÍTULO DE: INGENIERO AMBIENTAL.**

**DIRECTOR: YULEISY PAOLA NUÑEZ BLANCO**

**CODIRECTOR: DR. ISMAEL LUÍS SCHNEIDER**

**UNIVERSIDAD DE LA COSTA**

**DEPARTAMENTO DE CIVIL Y AMBIENTAL**

**PROGRAMA DE INGENIERÍA AMBIENTAL**

**BARRANQUILLA**

**2019**

Nota de aceptación

---

---

---

---

Firma del presidente del jurado

---

Firma del jurado

---

Firma del jurado

Barranquilla, septiembre del 2019

**Dedicatoria.**

A Dios por estar creando procesos en mi vida y colocarme esta oportunidad y lección, proporcionándome aprendizaje con cada día.

A mi madre Nelly Quintero que es desde el inicio y mi siempre, la guía, fuerza y motor para seguir realizando de la mejor manera posible mi vida, siendo mi amiga, confidente y cómplice en todo, brindándome la gran posibilidad de estudiar.

A Jair Peñaranda, mi padre, quien ha sido una de las mejores decisiones que he tomado en mi vida, amigo y consejero desde que lo recuerdo, agradecida por el profundo y sincero apoyo que me ha brindado.

A mi hermana María Sánchez, que sin saberlo llegó a mi vida para enseñarme y darle firmeza a lo que deseo ser y hacer.

A todos y cada uno de mis compañeros, amigos y docentes en la universidad en especial a aquellos que dieron lecciones las cuales hoy aprecio, por haber estado en esta etapa de aprendizaje y mi compañera Camila Barraza por su entereza que nos condujo a efectuar nuestro objetivo.

De esta manera les hago partícipes a todos y cada una de estas personas.

Leidy María Sánchez Quintero.

**Dedicatoria**

A Dios, por ser mi luz y mi guía espiritual, llenarme de fuerza, amor y fe.

A mis padres, Alex Barraza y Dora Villarreal, por haberme forjado como la persona que soy en la actualidad, por ser mi apoyo incondicional y llenarme de consejos que me alientan a cumplir cada uno de mis sueños. Siempre serán, mi motor y la razón de alcanzar mis metas propuestas. Los amos.

A mi compañera Leidy Sánchez, por su paciencia y trabajo en equipo que nos llevó a cumplir nuestro objetivo.

Camila Andrea Barraza Villarreal

**Agradecimientos**

A Dios, quien nos dio las fortaleza y sabiduría en este camino de la enseñanza y la fortuna de tener momentos satisfactorios como este.

A la profesora, Yuleisy Núñez, Docente de la Universidad de la Costa, por habernos brindado su asesoría, comprensión y amistad sincera durante el desarrollo del proyecto.

Al profesor, Ismael Schneider, Docente de la Universidad de la Costa, quien fue guía durante la ejecución de este proyecto.

Al cuerpo de docentes que impartieron su conocimiento a lo largo de toda la carrera y estuvieron siempre para la formación de profesionales íntegros.

A la Universidad de la Costa y sus instalaciones que fueron de gran ayuda para poder desarrollar este proyecto.

A todas las personas que de una u otra forma estuvieron todo el tiempo a nuestro lado apoyándonos y enseñándonos, aportando cada uno su granito de arena.

### Resumen

La contaminación del aire es uno de los problemas ambientales más importantes debido a la creciente urbanización. De los contaminantes que más afectan a la calidad del aire está el material particulado atmosférico. Este proviene de múltiples fuentes como el tráfico vehicular, emisiones industriales y quemas indiscriminadas, entre otras. De esta forma, la zona Centro Norte – Histórico de Barranquilla, por su ubicación, es susceptible al deterioro en la calidad del aire ya que recibe el aporte de estas fuentes, haciendo necesario el seguimiento de las concentraciones de estos contaminantes. En este estudio fueron evaluados los niveles de PM<sub>10</sub> mediante dos metodologías en la Región Norte-Centro Histórico de Barranquilla entre abril y octubre del año 2018. Las concentraciones fueron determinadas empleando el método gravimétrico con un muestreador de bajo costo *Stacked Filter Unit* (SFU) y el equipo Partisol, validado por la Agencia de Protección Ambiental de Estados Unidos (EPA). Los resultados obtenidos por estas dos metodologías fueron comparados utilizando diferentes análisis estadísticos. Igualmente fue evaluada la influencia de los parámetros meteorológicos en las concentraciones de PM<sub>10</sub> y la contribución del transporte a larga distancia de este contaminante. Los resultados arrojaron una concentración promedio de PM<sub>10</sub> de 46,40 µg/m<sup>3</sup>, respetando los estándares de Calidad de Aire para Colombia. El muestreador presentó una eficiencia de 98,26% en la recolección de PM<sub>10</sub>. Igualmente se evidenció que las variables meteorológicas influyen directamente en las concentraciones de PM<sub>10</sub>. Quedó demostrada la confiabilidad del muestreador de bajo costo SFU para el monitoreo continuo de este importante contaminante atmosférico.

**Palabras Clave:** Contaminantes atmosféricos, Material Particulado, PM<sub>10</sub>, Variables Meteorológicas, transporte a larga distancia

### Abstract

Air pollution is one of the most important environmental problems due to increasing urbanization. One of the pollutants that most affect air quality is atmospheric particulate material. This comes from multiple sources such as vehicular traffic, industrial emissions and indiscriminate burning, among others. In this way, the North-Historic Center of Barranquilla, due to its location, is susceptible to air quality deterioration since it receives the contribution of these sources, making it necessary to monitor the concentrations of these pollutants. In this study, PM<sub>10</sub> levels were evaluated using two methodologies in the North-Historic Center of Barranquilla between April and October of 2018. Concentrations were determined using the gravimetric method with a low-cost *Stacked Filter Unit* (SFU) sampler and the Partisol equipment, validated by the United States Environmental Protection Agency (EPA). The results obtained by these two methodologies were compared using different statistical analyzes. Likewise, the influence of meteorological parameters on PM<sub>10</sub> concentrations and the contribution of long-distance transport of this pollutant were evaluated. The results showed an average PM<sub>10</sub> concentration of 46.40 µg/m<sup>3</sup>, respecting the Air Quality standards for Colombia. The sampler showed an efficiency of 98.26% in the collection of PM<sub>10</sub>. It was also shown that meteorological variables directly influence PM<sub>10</sub> concentrations. The reliability of the low cost SFU sampler for continuous monitoring of this important air pollutant was demonstrated.

**Keywords:** Atmospheric pollutants, Particulate Material, PM<sub>10</sub>, Meteorological Variables, long distance transport



## Tabla de Contenido

Introducción.....	15
1.Planteamiento del problema y justificación.....	17
2.Objetivos.....	19
2.1.    Objetivo general.....	19
2.2.    Objetivos específicos .....	19
3.Estado del arte.....	20
4.    Marco teórico .....	23
4.1.1.    Contaminación atmosférica .....	23
4.1.2.    Material particulado .....	24
4.1.3.    Afectaciones en la salud.....	26
4.2.4. Métodos y equipos para medir concentración .....	28
4.2.5. Influencia de variables meteorológicas .....	31
4.2.6. Transporte a larga distancia .....	32
5.Metodología.....	34
5.1.    Área de estudio .....	34
5.1.1.    Localización .....	34
5.2.    Recolección de muestras .....	34
5.4.    Análisis de la influencia del transporte a larga distancia en las concentraciones de PM <sub>10</sub>	41
6.Resultados y discusión .....	42
7.Conclusiones.....	56

8.Recomendaciones.....	57
9.Referencias .....	58
10.Anexo. ....	67

**Lista de figuras y tablas****Figuras**

Figura 1. Comparación de los distintos tipos de diámetros de material particulado con el cabello humano y con la arena fina de playa medidos en micras. ....	25
Figura. 2. Depósito de partículas de distinto tamaño en el sistema respiratorio .....	27
Figura 3. Localización del área de estudio. ....	34
Figura 4. Microbalanza SARTORIUS ..35Figura. 2. Depósito de partículas de distinto tamaño en el sistema respiratorio .....	35
Figura 5. Método gravimétrico .....	35
Figura 6. Montaje del muestreador de partículas PM <sub>10</sub> (SFU) y esquema de diseño.....	36
Figura 7. Muestreador Volumétrico tipo: Thermo Scientific Partisol 2000i-D.....	39
Figura 8. Muestreador Stacked Filtred Unit. ....	39
Figura. 9. Grafica comparativo de la concentración de PM <sub>10</sub> . ....	43
Figura 10. Comparación de las concentraciones de PM <sub>10</sub> para los dos sistemas de muestreo (Stacked Filter Unit x Partisol) .....	45
Figura 11. Trayectoria del 07 de junio del 2018.....	53
Figura 12. Trayectoria del 10 de octubre del 2018. ....	54

## Tablas

Tabla 1. Tabla de Resumen estadístico descriptivo .....	42
Tabla 2. Relación PM10 para diferentes países y ciudades.....	44
Tabla 3. Prueba de Normalidad según Kolmogory-Smirnov y Shapiro-Wilk .....	46
Tabla 4 Correlación entre las concentraciones de PM10 (con las dos metodologías y las variables meteorológicas). ....	47
Tabla 5. Origen de masas de aire en Región Centro – Histórico de Barranquilla a 500 m AGL durante el muestreo .....	50
Tabla 6. Origen de masas de aire en Región Centro – Histórico de Barranquilla a 1500 m AGL durante el muestreo .....	51
Tabla 7. Origen de masas de aire en Región Centro – Histórico de Barranquilla a 2500 m AGL durante el muestreo .....	52

### Glosario

**Aerosol:** es un conjunto de partículas microscópicas, solidas o liquidas que se encuentran en suspensión en un gas.

**Aire:** es la mezcla y acumulación de gases en la atmosfera terrestre.

**Atípico:** que se aparta de algo conocido por sus características peculiares.

**Atmósfera:** es la envoltura gaseosa del planeta tierra. Está conformada por un 78% de nitrógeno, 21% de oxígeno y otros elementos

**Calidad ambiental:** los atributos mensurables de un producto o proceso que indican su contribución a la salud e integridad ecológica. Estado físico, biológico y ecológico de un área o zona determinada de la biosfera, en términos relativos a su unidad y a la salud presente y futura del hombre y las demás especies animales y vegetales.

**Calidad del Aire Ambiente:** estado del aire ambiente según lo indique su grado de contaminación.

**Concentración:** se refiere a la cantidad dispersa de un material o sustancia contenida en un medio dado.

**Contaminación Atmosférica:** es el fenómeno de acumulación o concentración en la atmósfera de fenómenos físicos o sustancias o elementos en estado sólido, líquido o gaseoso, causantes de efectos adversos en el medio ambiente y la salud humana.

**Contaminante Primario:** contaminante del aire emitido directamente por una fuente.

**Contaminante Secundario:** contaminante que puede ser producido en la atmósfera por procesos físicos o químicos, a partir de contaminantes primarios u otras sustancias presentes como resultado de emisiones de fuentes estacionarias o móviles.

**Contaminantes Antropogénicos:** producidos por la acción del hombre en diferentes procesos.

**Correlación:** correspondencia o relación recíproca entre dos o más acciones o fenómenos.

**Dispersión:** es la acción que tienen los gases y partículas contaminantes de esparcirse en un medio debido al arrastre del viento o el efecto de los movimientos verticales.

**Emisión:** es la descarga directa o indirecta a la atmosfera de gases o partículas por una fuente fija o móvil.

**Hysplit:** herramienta para estimar la trayectoria progresiva o regresiva de una masa de aire.

**Inmisión:** es la concentración de contaminante que llega a un receptor, más o menos lejano de la fuente de emisión, una vez transportado y difundido por la atmósfera.

**Monitoreo:** acción del proceso sistemático de recolectar, analizar y utilizar información para hacer seguimiento de la calidad del aire.

**Regresión Lineal:** es un análisis estadístico para aproximar la relación de dependencia entre una variable dependiente y las variables independientes

**Rosa de Vientos:** representación, mediante un diagrama polar del porcentaje de ocurrencia del viento y su velocidad según la dirección de incidencia hacia el observador

**Suspensión:** se aplica al estado de las partículas o cuerpos que se mantienen en el seno de un fluido durante cierto tiempo.

### Introducción

La calidad del aire se ha vuelto una de las temáticas más mencionadas y alarmantes ya que afecta a la población mundial (Calua Carrasco, 2018). Dentro del grupo de sustancias que afectan la calidad del aire, se encuentra el material particulado que es uno de los contaminantes criterio atmosférico y precursor que más está asociado a problemas ambientales generando afectaciones en la mayoría de las ciudades a nivel mundial (OMS, 2005).

El material particulado atmosférico según la Organización Mundial de la Salud es una compleja mezcla de partículas sólidas y líquidas de sustancias orgánicas e inorgánicas suspendidas en el aire. Las principales fuentes han sido identificadas como, antropogénicas, éstas mismas están subclasificadas en estacionarias y móviles, respectivamente, que son alimentadas en gran medida por el sector industrial y el parque automotor (Echeverri & Maya, 2008). Y como segunda medida, se encuentran las fuentes naturales de las cuales se destacan las erupciones volcánicas, tormentas de polvos, entre otros.

Las condiciones climáticas son indispensables para describir la dinámica de los contaminantes atmosféricos. La dispersión y el transporte de las partículas suspendidas en el aire son dependientes de la variación topográfica entre otras características de la zona. Por lo tanto, la determinación de los parámetros meteorológicos es fundamental en todo estudio de calidad de aire, ya que variables como la velocidad y dirección del viento, la humedad relativa, la temperatura, la precipitación, y en algunos casos la radiación solar, tienen un rol importante en el comportamiento y el aumento o disminución de la contaminación atmosférica (Oviedo & Barrios, 2017).

En Colombia, según el Ministerio de Ambiente en el 2010 afirma que algunos contaminantes sobrepasan los estándares límites permisibles establecidos por normativa

ambiental. Ocasionado la necesidad de seguir promoviendo la gestión de la calidad del aire para brindar y resguardar la salud de la población y el ambiente. Dentro de estos contaminantes, la emisión de Material Particulado (MP), está asociado a la decaída en la calidad del aire y la salud humana (MinAmbiente, 2010).

Colombia, también tiene redes de monitoreo para la constante vigilancia, lo que permitiría alertar y prevenir un riesgo además de contribuir a la mitigación del impacto (Arrieta Fuente, 2016). Para ello, existen varias metodologías y equipos utilizados para el muestreo del material particulado, el método gravimétrico o método analítico cuantitativo donde se determina la masa pesando el filtro, a temperatura y humedad relativa controladas, antes y después del muestreo es un ejemplo de ello (Regalado Contreras, 2015). Actualmente, ya se encuentran establecidas ciertas recomendaciones de equipos de monitoreo, pero existen metodologías más asequibles que pueden suplir la necesidad de países en vía de desarrollo especialmente o zonas con limitaciones para realizar esta actividad. Atendiendo a esta necesidad, el *Stacked Filter Unit* es un muestreador de bajo costo que mide la concentración de la forma anteriormente descrita del contaminante en este estudio seleccionado, generando soluciones para las redes de monitoreo.

Atendiendo a esto, la Agencia Internacional de Energía Atómica (AIEA) en conjunto con varios programas de investigación, contrataron a la Universidad de Gent para diseñar y construir un prototipo que pudiera cumplir a satisfacción con la recolección del contaminante (Hopke et al., 1997). De allí surgió el *Stacked Filter Unit*, es un muestreador con un diseño optimo el cual mide la concentración del material particulado, generando posibles soluciones para establecer redes de monitoreo más asequibles y eficientes. Por tanto, para seguir impulsando esta gestión, en la presente investigación se llevó acabo un monitoreo de PM<sub>10</sub> en la Universidad de la Costa (CUC) ubicada en ciudad de Barranquilla en la Región Norte-Centro Histórico por medio del *Stacked Filter Unit*. Para evaluar su diseño y desempeño, se



comparó esta metodología de medición con el equipo Partisol, validado por la Agencia de Protección Ambiental de Estados Unidos y conocido como método de referencia. Igualmente se verificó la influencia de las variables meteorológicas, así como el análisis de la contribución de transporte a larga distancia de PM<sub>10</sub>.

### **1. Planteamiento del problema y justificación**

Se considera que el aire de buena calidad es un derecho fundamental para el bienestar del ser humano (OMS, 2016). Sin embargo, sus condiciones se muestran en una constante amenaza ya que la emisión de distintos contaminantes atmosféricos en altas concentraciones es causante de cambios en las propiedades morfológicas, físicas, químicas y termodinámicas del planeta, trayendo consigo afectaciones asociadas salud humana (Suarez y Augusto, 2012).

Esta problemática de la exposición al contaminante a estado asociada a problemas de la salud humana relacionadas hasta con 6,5 millones de muertes a nivel mundial y 4,2 millones de muertes prematuras en todo el mundo por año; esta mortalidad se debe a la exposición a partículas de 10 micrones o menos (OMS, 2018). Igualmente, las enfermedades cardiovasculares, respiratorias y cáncer están asociados a la alta exposición al material particulado (OMS, 2018).

Por otra parte, las condiciones climáticas son fundamentales para describir el comportamiento de los contaminantes atmosféricos, ya que la dispersión y el transporte de las partículas suspendidas, es dependiente de las variaciones globales y regionales del clima y de las condiciones topográficas (Garrillo, 2010). Por este efecto, el punto de muestreo en el que se desarrolla esta investigación es muy importante ya que se encuentra vientos abajo y se caracteriza por ser receptor de multifuentes como lo son las industriales, las quemas

indiscriminadas que ocurren en el Parque Isla Salamanca, el tráfico vehicular, entre otras a la que se expone la población cercana.

En Barranquilla, la calidad de aire se mide en diferentes puntos de la ciudad mediante monitoreos diarios que realizan las entidades ambientales. Esta entidad declara según su reporte del año 2018, que Barranquilla cumple con la resolución nacional 2254 del año 2017, exceptuando una serie de días en los cuales se eleva especialmente la concentración del contaminante PM<sub>10</sub> (Barranquilla Verde, 2019). Aunque cada país tenga sus modelos y enfoques con la reglamentación esto no exime el objetivo mundial de disminuir los niveles de contaminación (Ramírez et al., 2018).

Sin embargo, la vigilancia de la calidad del aire debe definirse de una forma concisa y clara. Deben ser congruentes con las posibilidades técnicas y económicas de la entidad y de la población estudio. Algunos sistemas son difusos, muy restringidos o demasiados ambiciosos, dando como resultado programas poco efectivos y costosos, con información poco relevante con mínima utilización de los datos y por ende con uso inadecuado de los recursos disponibles.

De esta manera, probar y validar sistemas de monitoreo de bajo costo, que sean demostrados como eficientes, es de fundamental importancia. Estas metodologías sencillas pueden ser complementarias a los Sistemas de Vigilancia de la Calidad de Aire ya existentes, permitiendo comprender mejor como se da la distribución espacial y temporal de los contaminantes atmosféricos (MAVDT, 2010).

Por esta razón, la presente investigación busca cuantificar la concentración del material particulado PM<sub>10</sub> a la que está expuesta la población de la Región Norte-Centro Histórico de la ciudad de Barranquilla por medio del *Stacked Filter Unit* y además comprar con otra

metodología de medición validada internacionalmente. Todo esto para dar respuesta al siguiente interrogante:

¿El diseño del muestreador *Stacked Filter Unit* (SFU) cumple con los requisitos para recolectar una muestra de material particulado PM<sub>10</sub> en la Región Norte-Centro Histórico de la ciudad de Barranquilla?

## 2. Objetivos

### 2.1. Objetivo general

Evaluar la concentración de material particulado PM<sub>10</sub> utilizando dos metodologías en la Región Norte-Centro Histórico de la ciudad de Barranquilla.

### 2.2. Objetivos específicos

- ✓ Determinar la concentración de material particulado PM<sub>10</sub> en el área de estudio.
- ✓ Comparar dos metodologías de recolección de PM<sub>10</sub> (*Stacked Filter Unit* y muestreador dicotómico de partículas).
- ✓ Verificar la influencia de los parámetros meteorológicos en la concentración de PM<sub>10</sub> analizando la contribución del transporte a larga distancia.

### 3. Estado del arte

Alrededor del mundo se ha demostrado la relevancia de los contaminantes que sobrepasan los valores permisibles por la ley o algunas entidades, que usualmente trae con sí, afectaciones o consecuencias a la salud del hombre o al medio ambiente (Ahumada & Tibabija, 2017). Bajo esta necesidad de vigilancia y referencias se han realizado investigaciones en distintas partes del mundo relacionadas con el monitoreo y control de las emisiones el material particulado. Por ejemplo, en el continente Asiático en la ciudad de Beijing-China se obtuvieron las concentraciones diarias de PM<sub>10</sub> recolectadas de las 19 estaciones de su red de monitoreo y así por medio del modelo Máxima Entropía (MaxEnt) obtuvieron un mapa de la distribución del contaminante, resultando que el modelo es efectivo para predecir la distribución y además de que el tráfico y la cobertura de suelo son los dos factores más importantes que afectan la distribución de altas concentraciones de PM<sub>10</sub> (Zhang et al., 2017). Por su parte, en el continente europeo, al sur de Italia, se evaluó la concentración de PM<sub>10</sub> y PM<sub>2.5</sub> con un muestreador de bajo volumen dual (Hydra-fai) durante un año, mediante el análisis espacial y temporal de las concentraciones, convirtiéndose estas en variables dependientes para el comportamiento del contaminante (Perrone et al., 2019), trayendo a luz la necesidad de atención a este contaminante.

Así mismo, en otra investigación al sur de España, evaluaron la emisión, transporte, dispersión y deposición de metales pesados contenidos en el PM, emitidos en tres sitios a favor del viento en un área industrial, utilizando el modelo HYSPLIT, los resultados mostraron que las emisiones industriales modeladas muestran una consistencia razonable con la evolución temporal de las concentraciones de los metales (Chen et al., 2013).

Por otro lado, en otras regiones del mundo como en América Latina, se han implementado estudios de calidad de aire. Un ejemplo de esto se da en la ciudad de Riobamba en Ecuador, aquí los autores realizaron un muestreo en la Universidad UNACH con un equipo

DustTrak™ II, hallando altas concentraciones de PM<sub>10</sub>, debido a los aportes de las emisiones vehiculares e industriales aledañas (Bayas, 2017).

Por otra parte, el muestreador *Stacked Filter Unit* ha sido tema de interés para investigaciones, de ahí varias agencias internacionales coordinaron estudios que comprendido en el análisis de PM<sub>10</sub> comercial, recolección aerodinámica de la entrada del impactador y la reproducibilidad de la muestra de recolección masiva.

De igual manera, en la Lima y Callao realizaron análisis del PM<sub>10</sub> donde se utilizaron datos de concentración, comparados con el Estándar Nacional de Calidad Ambiental del Aire (ENCA) del Perú y las guías de la OMS. Una de las estaciones superó significativamente los valores límites con una concentración anual de 50 µg/m<sup>3</sup> debido a la contribución de las fuentes como el parque automor (Valdivia, 2016), señalando con estos estudios la posible relación que existe entre la concentración y la cantidad de fuentes de cada región. También en São Paulo se determinó la fuente de contaminantes entre agosto de 2011 y enero de 2014 por medio de análisis gravimétrico, se observó una gran similitud en las concentraciones medidas en las estaciones, lo que indica semejanza entre estas dos variables .

Por otra parte, el muestreador *Stacked Filter Unit* ha sido tema de interés para investigaciones de este contaminante. De ahí varias agencias internacionales coordinaron estudios para el análisis de un PM<sub>10</sub> comercial, examinando las características aerodinámicas de la entrada y la reproducibilidad de la muestra, los resultados señalaron a este equipo como buena base para la observación del comportamiento del PM<sub>10</sub> (Hopke et al., 1997). Siguiendo la línea de estudio, en la costa del mediterráneo se analizaron muestras diarias de PM<sub>10</sub> Y PM<sub>2,5</sub> durante un año con el mismo equipo, registrando mayores niveles en periodos de transición esto asociándose a emisiones primarias de aerosoles y en caso singulares se presentó aumento por fuentes naturales (Koçak et al., 2007). Igualmente, en el país de Nigeria

ubicado en África occidental, se monitoreo PM<sub>10</sub> y PM<sub>2.5</sub> puntualmente en Ikoyi Lagos para ambas fracciones segregadas por tamaño, usando el SFU en este caso de doble etapa como muestreador, señalando fuentes comunes en su contribución (Ezeh et al., 2012).

De igual manera en América latina se ha implementado. Como lo es el caso en la Ciudad de la Habana, donde recolectaron partículas con diámetro PM<sub>2.5-10</sub> o fracción gruesa y menores a 2.5 µm con un muestreador GENT de tipo *Stacked Filter Unit* (SFU por sus siglas en inglés), demostraron que hubo aportes de la industria a pequeña escala, suelo o polvo de carretera, quema de combustible, sales de mar e incineración de desechos y otras quemas (Piñera et al., 2010).

Trayendo a contexto locales, de acuerdo con las condiciones atmosféricas propias de Colombia, como en todos los países ubicados en la franja ecuatorial, la temperatura disminuye con la altura a razón de 6,0 °C a 6,5 °C por km. La temperatura casi no varía según las estaciones climáticas del año, como si sucede en Europa, Estados Unidos y países de latitudes medias. Además, tiene una variabilidad interanual en función de fenómenos naturales como el niño y la niña, y una muy marcada variabilidad diurna (Enríquez, 2012).

Por consiguiente, estas condiciones son importantes para los estudios que se realizan en el país, por ejemplo, en el Valle de Aburrá se estimó PM<sub>10</sub> diariamente con equipos activos, llegando hasta 300 µg/m<sup>3</sup> atribuyéndose a la alta congestión vehicular (Bedoya & Martínez, 2009). Al igual que en la ciudad de Medellín, con un muestreador de alto volumen (Hi-Vol PM<sub>10</sub>) se analizaron las concentraciones de partículas finas (PM<sub>2.5</sub>) y respirables (PM<sub>10</sub>) encontrado que un 36% cumple con la normatividad con una concentración en 44.8 µg/m<sup>3</sup> (Echeverri & Maya, 2008). Otro análisis, realizado en Bogotá en zona industrial, se valoró la concentración de PM<sub>10</sub> con equipos de referencia de alto volumen (Hi-Vol), donde concluye

que las concentraciones diarias varían entre 65 y 100  $\mu\text{g}/\text{m}^3$ , mientras que para el norte de la ciudad variaban entre 20 y 30  $\mu\text{g}/\text{m}^3$  (Pachón & Sarmiento, 2008).

Igualmente hay algunos estudios desarrollados en la Región Caribe Colombiana. En el año 2006, específicamente en la ciudad de Santa Marta, se realizó un estudio dónde se presentaron las concentraciones más altas coincidiendo con el periodo de escasas lluvias, se observó que durante todo el periodo de estudio se registraron concentraciones superiores a los 100  $\mu\text{g}/\text{m}^3$  en el centro del área de la ciudad asociándose a la contribución de fuentes de emisión como el manejo y almacenamiento de carbón y el tráfico vehicular. Por su parte, en la ciudad de Barranquilla capital del Departamento del Atlántico, específicamente en la Universidad de la Costa, tuvo a lugar un estudio en el cual se trazaron como objetivo evaluar el aporte de las diferentes fuentes de material particulado, obteniendo una concentración promedio de 63,1  $\mu\text{g}/\text{m}^3$  (Rugeles & Silva, 2017).

#### **4. Marco teórico**

##### **4.1.1. Contaminación atmosférica**

Un contaminante del aire es cualquier gas o partícula que, a una concentración lo suficientemente alta, puede ser perjudicial para la vida, el medio ambiente (Brusseau et al., 2019). La Agencia de Protección Ambiental de Estados Unidos (EPA por sus siglas en inglés) definen por su parte que la contaminación atmosférica es la presencia de sustancias químicas en concentraciones elevadas en el aire que pueden hacer daño a los seres humanos, otros animales, a la vegetación o a los materiales (MiniAmbiente, 2019). Los principales mecanismos de contaminación atmosférica son los procesos industriales que implican combustión, tanto en industrias como en automóviles y calefacciones residenciales, que generan dióxido y monóxido de carbono, óxidos de nitrógeno y azufre, entre otros contaminantes. Igualmente, algunas industrias emiten gases nocivos en sus procesos

productivos, como cloro o hidrocarburos que no han realizado combustión completa (Zurrita et al., 2019).

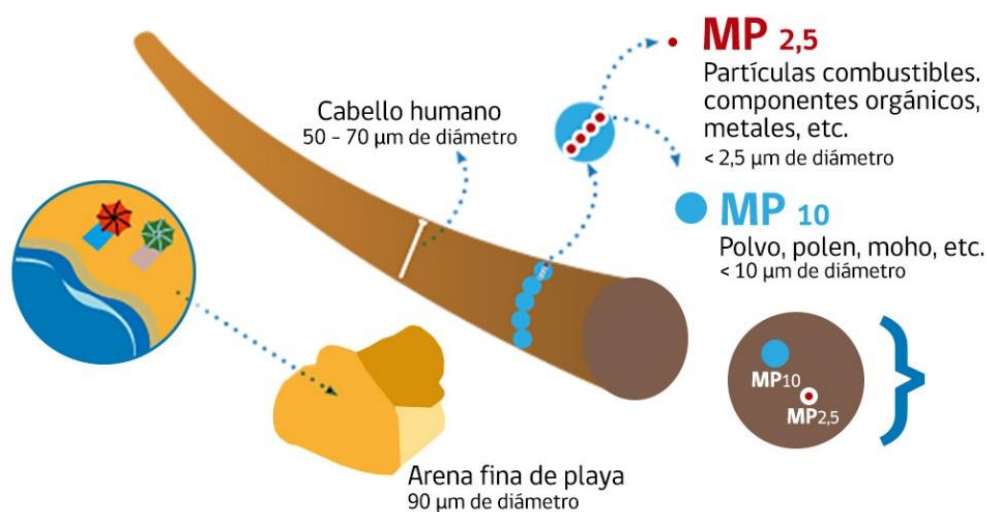
#### 4.1.2. Material particulado

El material particulado es uno de los contaminantes criterio que se encuentran en la atmósfera, siendo uno de los principales problemas ambientales a los que se enfrenta la mayoría de las ciudades (OMS, 2005). No están en forma de gas por lo tanto se denominan con el nombre genérico de partículas, las cuales se forman mediante subdivisiones o roturas de fragmentos mayores de materia y/o por aglomeración de fragmentos pequeños incluyendo moléculas (Matus c. & Lucero ch., 2002). Estas partículas que están resuspendidas en el aire, por su tamaño, no sedimentan rápidamente, si no que permanecen por un tiempo prolongado en el aire (Arciniegas, 2012).

La morfología y tamaño de las partículas varía ampliamente dependiendo principalmente de su origen (natural o antrópico) y la fase en que se presenta. Cuando las partículas están en fase líquida la forma es esférica. En cambio, las partículas sólidas poseen gran variedad de formas, a veces esféricas, rectangulares, aciculares, astilladas, etc, (EPA, 2009). El tamaño del material particulado es un parámetro muy importante en la determinación de efectos (*Ver Figura 1*), tasa de deposición, tiempo de residencia en la atmósfera y destino de las partículas (Alvarado Zúñiga, 2010). Estas partículas pueden ser clasificadas en menores o iguales a 10 micras (PM<sub>10</sub>), en menores o iguales a 2,5 micras (PM<sub>2.5</sub>) y menores o iguales a 0,1 micras (PM<sub>0.1</sub>) (Contreras Carrillo, 2012). De esta forma se determinan que para partículas en el rango de 0,1 - 10 µm el tiempo de residencia en la atmósfera es cercano a una semana, en cambio en la estratósfera es de meses a años (Jaenicke, 1980). En la *Figura 1* se observan las partículas que comprenden entre 2,5 y 10µm, las cuales son llamadas partículas gruesas, también se utiliza como termino integrador del total de las partículas gruesas y finas, desde el punto de vista operacional la medición del componente es importante para la salud ya que



pueden ser inhaladas, es decir que penetren el árbol respiratorio más allá de la laringe (Contreras Carrillo, 2012).



*Figura 1. Comparación de los distintos tipos de diámetros de material particulado con el cabello humano y con la arena fina de playa medidos en micras.*

*Fuente: Ministerio de Medio Ambiente, Chile.*

Existen varias clasificaciones según su origen de emisión, las cuales son según su fuente generadora y su naturaleza (Artiñano et al., 2003). En la primera clasificación se presentan las naturales y antrópicas, se considera naturales aquellas por ejemplos: el rocío del agua de mar, partículas de polen, polvo, y partículas provenientes de erupciones volcánicas, así como de materiales arrastrados por los vientos derivados de la erosión del suelo (Arciniegas, 2012).

Generalmente, las partículas provenientes de fuentes naturales tienden a ser gruesas, con cortos periodos de permanencia en el aire y altas velocidades de sedimentación (García Lozada, 2006); por lo contrario, la segunda clasificación, puede ser diversas dada por su condición ya que estas incluyen procesos industriales de extracción y transformación; procesos de generación de calor a nivel industrial y doméstico; quema de combustibles fósiles, quema de residuos a campo abierto; actividades de transporte, almacenamiento y traslado de materiales; y vehículos, entre otras (Yuquilema Vilema, 2018).

En las fuentes de emisión de contaminantes atmosféricos hay dos subcategorías, primarias y secundarias, y estas pueden tener diferentes subclasificaciones a su vez. Las fuentes primarias son aquellas emitidas directamente desde la fuente, en las cuales se pueden encontrar las fuentes de área; las fuentes fijas; fuentes móviles (MAVDT, 2010). Las fuentes secundarias son aquellas partículas liberadas que al llegar a la atmosfera se forman o se modifican sea por condensación, crecimiento, nucleación y producto de una reacción química (Contreras Carrillo, 2012). Estas, a su vez, pueden dividirse en inorgánicas como las provenientes de ganadería, fertilizantes, transportes y suelos; y orgánicas como las originarias de la combustión, carbón, evaporación y biológicas; un ejemplo típico es la formación de ácido sulfúrico a partir de la oxidación del dióxido de azufre en presencia de vapor de agua y luz solar (García Lozada, 2006).

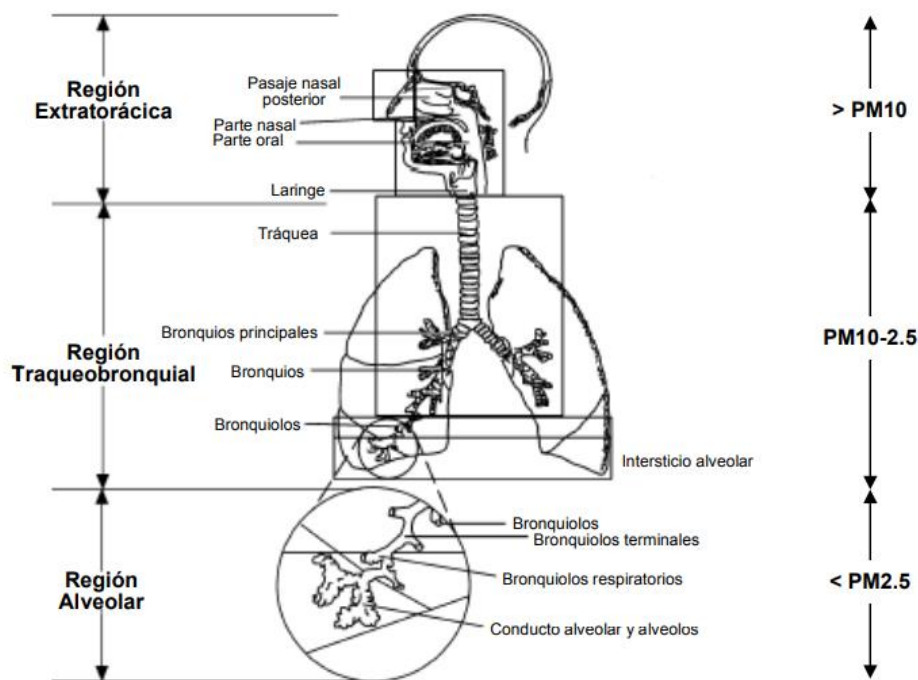
La distribución de los componentes del material particulado depende fuertemente de la localidad (Zuñiga, A, 2010). Las partículas finas tienen una combinación común con sulfatos, también contienen aerosoles secundarios. La combinación más concurrente para partículas gruesas ocurre con óxidos de silicio, aluminio, calcio y hierro (Salinas, 2012).

Material biológico como polen, esporas, virus o bacterias también pueden estar contenida en el PM<sub>10</sub>, estos microorganismos a los que están expuestos los seres humanos causan enfermedades infecciosas respiratorias. La atmósfera, es un medio muy utilizado por muchos microorganismos (esporas, bacterias, virus y hongos) para su dispersión. Algunos han creado adaptaciones especializadas para favorecer su supervivencia (Vivar Martínez, 2014).

#### **4.1.3. Afectaciones en la salud.**

Según la Organización Mundial de la Salud (OMS), el material particulado está asociado al incremento de mortalidad y morbilidad. Por otra parte, la exposición crónica se ha visto relacionado a serios problemas en la salud (Vivar Martínez, 2014), incluso las más difíciles

de diagnosticar y tratar. Estas enfermedades se presentan más que todo en función de la penetración y deposición de éstas en diferentes secciones del aparato respiratorio como se ve en la *Figura 2*, y la respuesta biológica a los materiales depositados (Contreras Carrillo, 2012).



*Figura. 2. Depósito de partículas de distinto tamaño en el sistema respiratorio (Según EPA, 2013)*

El impacto de las partículas del aerosol se produce cuando las partículas en el aire poseen suficiente impulso como para mantener su trayectoria a pesar de cambios en la dirección de la corriente (Contreras Carrillo, 2012), el tracto respiratorio superior es importante por dos razones: primero, por ser un potencial sitio de daño. Segundo, por la eficiente captación (Estévez García, 2010), las partículas más gruesas, sobre 5  $\mu\text{m}$  son filtradas por la acción conjunta de los cilios del conducto nasal (Alvarado Zúñiga, 2010). Las partículas menores se alojan fácilmente en los pulmones, como las partículas de tamaño inferior a 2,5  $\mu\text{m}$ , incluyendo las nanopartículas, las cuáles son capaces de llegar al interior de los alvéolos

pulmonares (Regalado Contreras, 2015). Cuando las partículas disminuyen en tamaño ( $<0,01 \mu\text{m}$ ) se comportan de manera similar a un gas de alta reactividad y se difunden hacia las paredes de la vía aérea depositándose (Harber et al., 1996).

Otra consideración que afecta la deposición de partículas higroscópicas, es el ambiente húmedo y tibio del tracto respiratorio, que favorece un cambio en su tamaño, así como su deposición de manera inicial para aerosoles higroscópicos comparados con los aerosoles no hidroscópicos (Harber et al., 1996), la deposición total en el pulmón de los humanos es cerca del 60% para partículas con diámetro  $<0.1 \mu\text{m}$ , disminuyendo a un 20% para el tamaño  $0.1 - 1 \mu\text{m}$  e incrementando a un 80% a partículas de  $5 \mu\text{m}$ . Deposición nasal de partículas  $1-3 \mu\text{m}$  ha sido reportado cercano a 20% en adultos en reposo, incrementando a 30-40% durante el ejercicio, con valores bajo entre 10 – 20% en niños con edades de 5- 15 años (Harber et al., 1996).

#### **4.2.4. Métodos y equipos para medir concentración**

En Colombia, se han diseñado distintas políticas de prevención de la contaminación del aire, acompañadas de normativas, como la Resolución No. 2254 de 2017 en las cuales se adoptan normas de la calidad del aire en territorio colombiano, protocolo para el Monitoreo y Seguimiento de la Calidad del Aire adoptado a través de la Resolución No. 650 de 2010.

Para el monitoreo del contaminante se tiene la existencia de diferentes métodos, como lo son el método gravimétrico o método analítico cuantitativo en los cuales las determinaciones de las sustancias se llevan a cabo por una diferencia de pesos, donde se determina la masa pesando el filtro, a temperatura y humedad relativa controladas, antes y después del muestreo (Regalado Contreras, 2015)

Los muestreadores pasivos, ofrecen una manera sencilla y económica de evaluar la calidad del aire en un área. Se basan en el principio de absorción molecular en un sustrato químico

seleccionado. Permiten recolectar una muestra, integrada en un periodo definido (por lo general de una semana a un mes), por difusión molecular en un material absorbente, específico para cada contaminante (SIAC, 2010), estos dispositivos de toma de muestra generalmente tienen forma de tubo o disco, la muestra se regresa al laboratorio, donde se realiza la desorción del contaminante y después se le analiza cuantitativamente, el tiempo de resolución de esta técnica es limitado, por lo que sólo puede proveer información de concentraciones promedio de contaminantes. Debido a su simplicidad, las técnicas de muestreo pasivo son adecuadas para muchas aplicaciones, ya sea por sí mismas o en combinación con analizadores automáticos (Durán Lombana & Moscoso Culma, 2018).

Los muestreo pasivo son adecuadas para muchas aplicaciones, ya sea por sí mismas o en combinación con analizadores automáticos (Durán Lombana & Moscoso Culma, 2018).

Los muestreadores activos, recolectan muestras de contaminantes por medios físicos o químicos para su posterior análisis en el laboratorio. Por lo general, se bombea un volumen conocido de aire a través de un colector como un filtro (muestreador activo manual) o una solución química (muestreador activo automático), durante un determinado periodo y luego se retira para el análisis (Calua Carrasco, 2018), este tipo de equipos requieren energía eléctrica para extraer el aire. El volumen adicional de aire muestreado incrementa la sensibilidad, por lo que pueden obtenerse mediciones diarias promedio. Aunque los muestreadores activos son más caros y complejos, son relativamente fáciles de operar, confiables y proporcionan base de datos de mediciones (Durán & Moscoso, 2018)

Los muestreadores automáticos, pueden proporcionar mediciones de tipo puntual con alta resolución (promedios horarios o cada 10 minutos) en un único punto para varios contaminantes criterios (SO<sub>2</sub>, NO<sub>2</sub>, CO, MP), así como para otros contaminantes importantes como los COV (SIAC, 2010), tanto en el tiempo como en el espacio, además, para evaluar la

eficacia de los programas que se implanten. La muestra se analiza en línea y en tiempo real, generalmente a través de métodos electro-ópticos: absorción de UV o IR; la fluorescencia y la quimioluminiscencia son principios comunes de detección (Peralta Quispe, 2017), y los datos pueden ser transmitidos en tiempo real. Para obtener datos exactos, precisos y confiables con esta técnica, debe alcanzarse un estándar alto de mantenimiento y de operación además de un adecuado programa de aseguramiento y control de calidad (SIAC, 2010).

Existen diferentes tipos de equipos de medición de material particulado que dependen de la fracción según el diámetro aerodinámico de la partícula que se pretenda analizar (PM<sub>10</sub> y otros 20 tamaños de material fraccionado como PM<sub>2.5</sub> y PM<sub>1</sub>, PM<sub>2.5-10</sub>, etc) (Doria Oviedo & Porras Barrios, 2017), Existen muestreadores que se diferencian en su controlador de flujo, siendo de sistema MFC (controlador de flujo de tipo másico) o VFC (controlador de flujo de tipo volumétrico) (MAVDT, 2010). También se tienen equipos nombrados como bombas de muestreo personal, un ejemplo de estos es el equipo Anderson para medir PM<sub>10</sub>, también el Dustscan modelo 3000 y el Thermo modelo ADR-1200 S (Angulo, 2008).

Por su lado, se tiene un muestreador de bajo volumen referenciado así por la EPA que toma por nombre Partisol. Es un muestreador activo, que usa un impactado de cascada “dichotomous splitter”, para separar partículas gruesas de finas, el cual cuenta con un sistema de almacenamiento e intercambio de filtros permite que estos sistemas funcionen hasta 16 días de muestreo diario entre visitas al sitio. (Djacinto Aparecido, 2015)

Como también se tiene el equipo *Stacked Filter Unidad* (SFU), que de igual forma es un muestreador activo, el cual usa versión "Gent" una unidad de filtro apilada, se basa en la filtración secuencial a través de dos Filtros Nuclepore con diferentes diámetros aerodinámicos el cual está equipado con una etapa de pre-impactación para su captación (Maenhaut et al., 1995).

#### 4.2.5. Influencia de variables meteorológicas

Las condiciones meteorológicas influyen sobre el transporte y dispersión de los contaminantes en la atmósfera, así como también en los procesos de remoción de estos. Ellas determinan, junto a otros factores, los valores de inmisión de contaminantes en el aire, dentro de estos se plantea las variables meteorológicas Precipitación, Humedad, Temperatura, Velocidad del viento y Dirección (Vidal Ros et al., 2018).

Las diferencias térmicas durante el periodo pueden traducir en episodios con menor efecto del ascenso del aire y en las noches mayores efectos, con un fortalecimiento de los vientos (Gómez Parada, 2001). La humedad relativa suele tener un comportamiento casi opuesto al de la temperatura, con la salida del sol y el incremento de la temperatura, la humedad relativa comienza a descender hasta alcanzar un mínimo (Vidal Ros et al., 2018). Esta presenta una marcha anual que corresponde, en líneas generales, con el comportamiento estacional de las precipitaciones, donde dicha humedad relativa alta ofrece condiciones favorables para la disminución de las concentraciones de gases y partículas (Préndez & Calderón, 2013).

Otra variable que es favorable para la disminución de concentraciones del material particulado es la velocidad del viento, el más importante en la renovación del aire sobre la superficie y en el transporte de los diversos contaminantes. Si el viento es moderado o fuerte cerca de la superficie, hay buena mezcla en las capas bajas de la atmósfera. De igual manera, el viento es el encargado de repartir las ganancias y pérdidas de calor en un gran número de moléculas, haciendo que sea menor, la variación diaria de la temperatura y la posibilidad de ocurrencia de inversiones térmicas (Moreno et al., 2010), que esta característica se relaciona con la temperatura primera variable mencionada.

En Colombia, por su posición geográfica, está bajo la incidencia de los vientos alisios del noreste y del sureste, corrientes que determinan, en buena medida, el comportamiento general del viento sobre el territorio nacional (Moreno et al., 2010). Por último, tenemos la dirección del viento, nos ayuda a rastrear el contaminante o ver las zonas afectadas desde cualquier punto evaluado, en la ciudad de barranquilla según estudio predominan dos flujos de viento con direcciones noreste (42.7%) y norte (25%), con predominio de vientos moderados.

También se presentan frecuencias relativas al Este, Sureste y Sur, con 5.8%, 6.1% y 6.1% de observaciones, respectivamente (Corte, Sierra & Valencia, 2015).

#### **4.2.6. Transporte a larga distancia**

Los modelos de calidad del aire utilizan técnicas matemáticas y numéricas para simular los procesos físicos y químicos que afectan a los contaminantes del aire a medida que se dispersan y reaccionan en la atmósfera (CIEMAT, 2016).

Estas técnicas se corroboran cuando la EPA recomienda modelos los cuales se basan en una serie de pruebas rigurosas que comparan sus predicciones con los resultados de experimentos de campo altamente controlados, un ejemplo de esta modalidad es cuando una de ellas radica en contrastar las resultas obtenidas con un modelo gaussiano y con otro tipo de modelo, en relación ambos con datos experimentales muy contrastados, obtenidos en procesos muy inspeccionados en su elaboración y en las medidas de campo (Vicéns, 2016).

También estos son usados para realizar análisis de modelos para respaldar las decisiones normativas y de políticas utilizando toda la gama de modelos y otras técnicas de simulación matemática utilizadas para evaluar las estrategias de control y la culpabilidad de la fuente (Ordoñez-Sánchez *et al.*, 2018).

Se tiene un modelo gaussiano no estacionario, favorito para valorar el transporte de contaminantes a larga distancia, llamado CALPUFF, el cual se comprende de tres



componentes principales: CALMET, que es un modelo meteorológico, CALPUFF, que es el modelo de dispersión, y CALPOST (un paquete de postprocesado). A ellos se añaden otros programas de pre-procesamiento y postprocesamiento (Scire et al., 2000)

Las condiciones de estancamiento, inversión, recirculación y fumigación; transporte sobre el agua y zonas costeras; transporte a larga distancia; viento débil y formación de contaminantes secundarios; finalmente, material particulado y fuentes de área extensa son las principales aplicaciones de Calpuff (Lavy, 2002).

Para este caso el modelo HYSPLIT es un sistema completo para calcular trayectorias de paquetes de aire simples, así como simulaciones complejas de transporte, dispersión, transformación química y deposición (Robayo Avendaño & Galindo Mendoza, 2014). Una aplicación común es un análisis de trayectoria posterior para determinar el origen de las masas de aire y establecer relaciones fuente-receptor. HYSPLIT también se ha utilizado en una variedad de simulaciones que describen el transporte atmosférico, la dispersión y la deposición de contaminantes y materiales peligrosos (Hernández-Ceballos *et al.*, 2011).

Para este caso el modelo HYSPLIT es un sistema completo para calcular trayectorias de paquetes de aire simples, así como simulaciones complejas de transporte, dispersión, transformación química y deposición (Robayo Avendaño & Galindo Mendoza, 2014). Una aplicación común es un análisis de trayectoria posterior para determinar el origen de las masas de aire y establecer relaciones fuente-receptor. HYSPLIT también se ha utilizado en una variedad de simulaciones que describen el transporte atmosférico, la dispersión y la deposición de contaminantes y materiales peligrosos (Hernández-Ceballos *et al.*, 2011).

## 5. Metodología

### 5.1. Área de estudio

#### 5.1.1. Localización

El monitoreo de Material Particulado PM<sub>10</sub>, se llevó a cabo en el área urbana de la ciudad de Barranquilla, capital del Atlántico, al norte de Colombia. El punto de muestreo se ubica más específicamente en la zona Norte – Centro Histórico, como se muestra en la *Figura 3*.

El área de monitoreo fue seleccionada en vista que se encuentra vientos abajo dada su condición geográfica, siendo susceptibles de múltiples fuentes entre ellas flota automotriz, zonas industriales y quemas indiscriminadas en Isla Salamanca.



*Figura 3. Localización del área de estudio.*

**Fuente:** Google Earth Pro-2018

### 5.2. Recolección de muestras

La determinación de las concentraciones de PM<sub>10</sub> se dio a través del método gravimétrico. (Figura 5) Los filtros de Teflón de 47 mm de diámetro fueron preservados en el desecador antes y después del muestreo durante 24 horas, con el fin de remover toda la humedad que tenían. Los pesajes fueron realizados hasta obtenerse peso constante, aceptándose a una

desviación estándar en las masas de máximo 10µg. Estos pesajes fueron realizados por una micro balanza (*Figura 4*) con una precisión de 1µg, en un espacio especialmente adaptado y con temperaturas entre 20-25 ° C y humedad relativa entre 35-40%, disminuyendo los errores en esta etapa, fundamental para la determinación de las concentraciones de PM<sub>10</sub>.



*Figura 4. Microbalanza SARTORIUS*

*Fuente: Autor propio.*

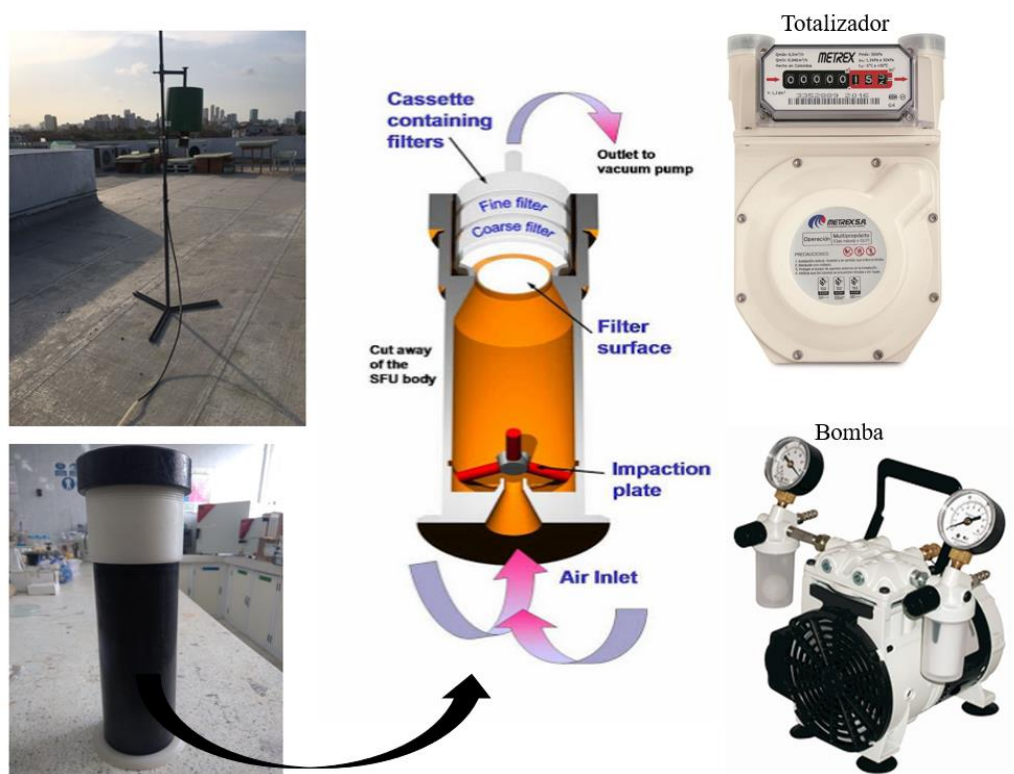


*Figura 5. Método gravimétrico*

*Fuente: Autor Propio.*

La recolección del material particulado se realiza por medio de un muestreado de partículas llamado Unidad de filtros apilados por sus siglas en inglés *Stacked Filter Unidad* (SFU) *Figura 6*. Este principio consiste en la filtración selectiva, es decir, la recolección de partículas retenidas mediante el tamaño uniforme de poros 10µg, con un caudal bajo aproximadamente de 16 litros por minuto, simulando la respiración del ser humano.

El muestreador fue ubicado en las instalaciones de la Universidad de la Costa (latitud 10° 59' 44,4" N y longitud 74° 47' 26,3" O). Cada filtro fue identificado con el código BAR + N° de filtro. La duración de muestreo fue de 48 horas, programado los días hábiles siendo el día lunes el primer montaje de filtro, en dado caso de día feriado se corre la fecha por un día.



*Figura 6. Montaje del muestreador de partículas PM<sub>10</sub> (SFU) y esquema de diseño.*

*Autor: (Autores y Gobierno de Australia)*

La recolección de información de datos se realiza por medio de un formato de campo (*Anexo 1.*) con el cual se registraban la fecha de muestreo, el flujo de aire muestreado, y algún evento importante ya sea clima u actividad predominante cercano al medio.

Adicionalmente, el volumen total de aire por minuto muestreado se mide directamente con el medidor de prueba (totalizador) integrado en el sistema. Se apaga la bomba y se realiza el cambio de filtro. Los filtros deben mantenerse en un recipiente hermético, minimizando la exposición a la intemperie evitando ser contaminada la muestra. Para obtener el peso final se realiza el promedio el promedio aritmético. El periodo de muestreo comprende el periodo entre el mes de abril de 2018 hasta el mes de octubre de 2018, registrando 37 muestras.

Para obtener la concentración de PM<sub>10</sub>, se determina la diferencia de masa, siendo esta el promedio del peso final menos el promedio del peso inicial, y se divide entre el volumen.

(Ec.1):

$$PM_{10} [\mu g/m^3] = \frac{(PROM_{P.Final} - PROM_{p.Inicial})}{Volumen} \quad (1)$$

*PM<sub>10</sub>*: Total de Material particulado.

*PROM<sub>P.Final</sub>*: Promedio del Peso Final de la Muestra.

*PROM<sub>p.Inicial</sub>*: Promedio del Peso Inicial de la Muestra.

*Volumen*: Volumen total de la muestra.

Para analizar el comportamiento de los datos se realiza el test estadístico de Kolmogorov–Smirano y el Test de Shapiro-Wilk siendo empleado para ambos un nivel de significancia del 95% y un p valor de 0,05. Se tomó en cuenta el Test de Shapiro-Wilk debido a que se presentan menos de 50 datos de muestreo. El comportamiento de los datos, permitió que se desarrollara la prueba no paramétrica, ya que se ajusta a una distribución libre, utilizando el coeficiente de Sperman, puesto que este coeficiente se utiliza para una

distribución de dato no normal. Por otro lado, se realiza un análisis descriptivo de las muestras de las concentraciones encontrando el promedio de la concentración de nuestro muestreo en general.

### **Comparación de dos metodologías de recolección de PM<sub>10</sub>**

Uno de los objetivos de esta investigación es comparar el sistema de muestreo de PM<sub>10</sub> del *Stacked FilterFiltre Unit* (muestreador de bajo costo) con un muestreador de partículas validado por la USEPA, y conocido como equipo de referencia. El muestreador dicotómico de partículas de la marca Thermo Scientific, modelo Partisol 2000i-D (*Figura 7*) fue configurado para trabajar en paralelo con el SFU. Este equipo puede registrar digitalmente parámetros como temperatura, presión barométrica y el volumen acumulado, siendo este corregido automáticamente por el microprocesador a condiciones estándares. Toda esta información puede ser descargada en medio magnético cuando se requiera, de lo contrario, se podrá visualizar estos datos en la pantalla del Equipo.

El *Stacked Filter Unit*, o SFU. Este sistema utiliza una entrada de diámetro de corte de 10 µm. Las partículas con diámetro inferior al diámetro de corte de 10 µm se recogen y se dividen en las fracciones menores a 2,5 µm y gruesa mayores a 2,5 µm y menores a 10 µm. El caudal del muestreador es típicamente de 17 L min<sup>-1</sup>. El volumen de aire muestreado se registra en un integrador de volumen, calibrado con un estándar de flujo de aire. (*Figura 8*)



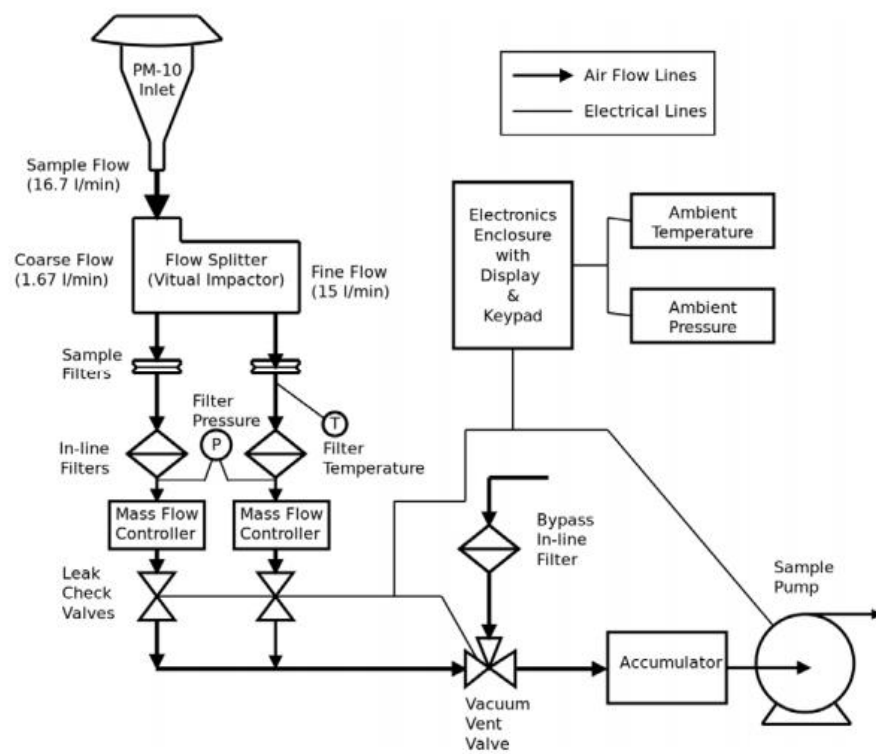


Figura 7. Muestreador Volumétrico tipo: Thermo Scientific Partisol 2000i-D

Fuente: Manual de Instrucciones

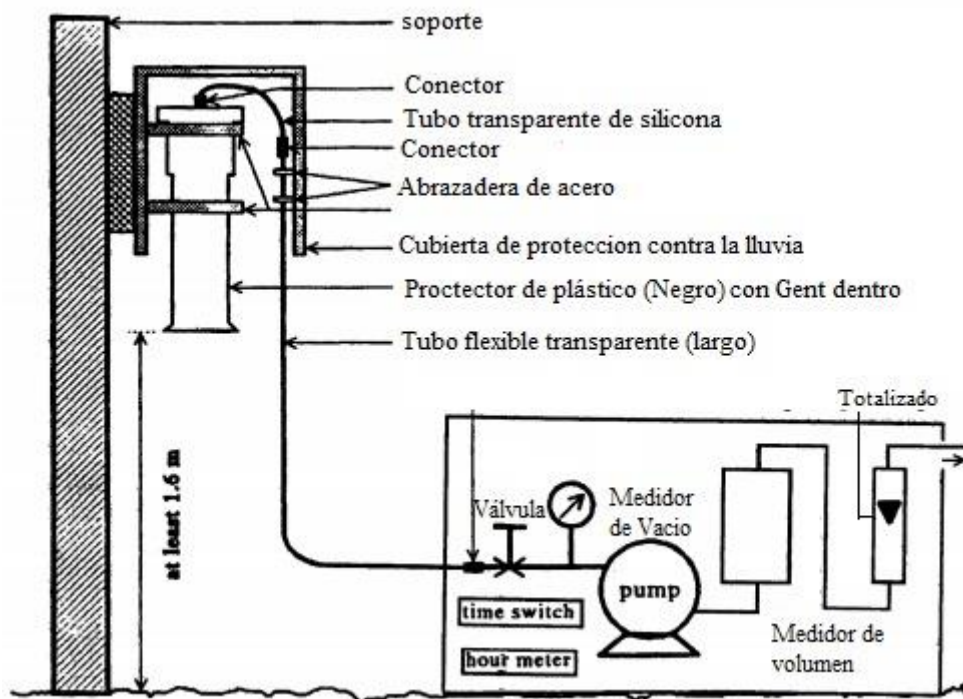


Figura 8. Muestreador Stacked Filter Unit

Fuente: Maenhaut, Francois, & Cafmeyer, 1994

Para medir la significancia entre el muestreador SFU con respecto al Partisol, se tabularon las concentraciones de PM<sub>10</sub> obtenidas por medio de cada uno de los equipos y posteriormente se correlacionaron mediante el IBM SPSS Statistics 22.0, utilizando el coeficiente Spearman con el fin de medir la veracidad de los resultados del SFU basado en los resultados del muestreo del Partisol.

### 5.3.Verificación de la influencia de los parámetros meteorológicos

Las variables meteorológicas fueron monitoreadas en la estación ubicada en la Universidad de la Costa por medio de una Estación Meteorológica de la marca Davys Instruments modelo Vantage Pro-2. La estación fue configurada para tomar registros a cada cinco minutos, suministrando automáticamente la información de las siguientes variables: temperatura, humedad relativa, velocidad del viento, dirección del viento, precipitación, presión atmosférica, y la radiación solar.

La media de las concentraciones del contaminante permite identificar el error de los equipos como se muestra en la siguiente formula

$$Error\ de\ equipo = \frac{(CP_{Partisol} - CP_{SFU})}{CP_{Partisol}} * 100 \quad (2)$$

$CP_{Partisol}$ : Concentración promedio del Partisol

$CP_{SFU}$ : Concentración Promedio *Stacked Filter Unit*

Posteriormente, por medio del software estadístico IBM SPSS Statistics 22.0 se correlacionan las variables meteorológicas y las concentraciones de PM<sub>10</sub>, utilizando el



coeficiente de Sperman debido a que este es utilizado por muestras no normales, con el fin de analizar el comportamiento y la influencia entre cada variable.

Posteriormente, por medio del software estadístico IBM SPSS Statistics 22.0 se correlacionan las variables meteorológicas y las concentraciones de PM<sub>10</sub>, utilizando el coeficiente de Sperman debido a que este es utilizado por muestras no normales, con el fin de analizar el comportamiento y la influencia entre cada variable.

#### **5.4. Análisis de la influencia del transporte a larga distancia en las concentraciones de PM<sub>10</sub>**

Para identificar el origen de las masas de aire se calculó y analizó la retro-trayectoria por medio de la herramienta Hysplit (*Hybrid Single Particle Lagrangian Integrated Trajectory*). Este modelo se ejecuta en línea mediante una plataforma en el sitio web de READY y es suministrado por el Laboratorio de Recursos Atmosféricos siendo sus siglas en inglés ARL, gracias a la Administración Oceánica y Atmosférica de Estados Unidos.

Para el presente estudio, mediante la versión en línea antes mencionada, se obtuvieron 37 retro trayectorias, para cada una de las muestras de PM<sub>10</sub> recolectadas. Para la hora inicial de cada muestra, se calculó una retro trayectoria de 48 h, representando, por lo tanto, el transporte realizado por la masa de aire de dos días anteriores y que aportan al punto de muestreo ubicado en la Universidad de la Costa. Las alturas isentrópicas consideradas fueron 500, 1500 y 2500 m medidas desde el nivel del suelo. La altura de 500 m se seleccionó teniendo en cuenta la incidencia dentro de la capa límite o altura de mezcla, la cual está influenciada directamente por las emisiones y contaminantes antropogénicos. Las alturas de 1500 y 2500 m se escogieron para analizar el comportamiento de las partículas de aire en la zona superior de la capa límite y en la troposfera libre, respectivamente.

En total se obtuvieron 37 mapas de retro trayectorias (una por cada muestra de PM<sub>10</sub>) siendo las fechas entre el mes de abril y el mes de noviembre de 2018 (ver Anexo 3).

Las trayectorias resultantes fueron subdivididas y agrupadas teniendo en cuenta su origen. De esta manera se obtuvo la concentración promedio de PM<sub>10</sub> para cada sector y se comparó significativamente las concentraciones entre sus direcciones. La existencia de sectores con mayores concentraciones puede ser indicativo del transporte de larga distancia.

## 6. Resultados y discusión

En la *Tabla 1* se observan el análisis descriptivo de las muestras de material particulado de partículas gruesas, estudiando los máximos, mínimos, la media y la desviación estándar.

*Tabla 1.*

*Tabla de Resumen estadístico descriptivo.*

	N	Mínimo	Máximo	Media	Desviación estándar
<b>CONCENTRACION PM<sub>10</sub> SFU <math>\mu\text{g}/\text{m}^3</math></b>	37	18,27	114,47	46,40	20,14
<b>CONCENTRACIONES PARTISOL PM<sub>10</sub> <math>\mu\text{g}/\text{m}^3</math></b>	37	13,60	114,81	45,61	21,28
<b>N válido (por lista)</b>	37				

*Fuente: IBM SPSS Statistics 22.0*

Para la fracción gruesa (PM<sub>10</sub>) nuestro objeto de estudio en el muestreo del *Stacked Filter Unit*, el máximo valor se presenta es de 114,47  $\mu\text{g}/\text{m}^3$ . Así mismo, el máximo valor para el Partisol fue de 114,81  $\mu\text{g}/\text{m}^3$ , mientras que el mínimo para ambos sistemas se reporta con una concentración de 18,27  $\mu\text{g}/\text{m}^3$  para el SFU y 13,6  $\mu\text{g}/\text{m}^3$  para el Partisol. Por otra parte, la concentración promedio que se obtuvo fue de 46,40  $\mu\text{g}/\text{m}^3$  del SFU y 45,61  $\mu\text{g}/\text{m}^3$

Partisol. Al analizar la desviación estándar de la muestra de datos para el SFU se observa que su valor está alejado de cero con una desviación de 20,14 interpretando que los datos están dispersos alejándose del promedio, sin embargo, los valores entre ambos equipos mantienen una similitud.

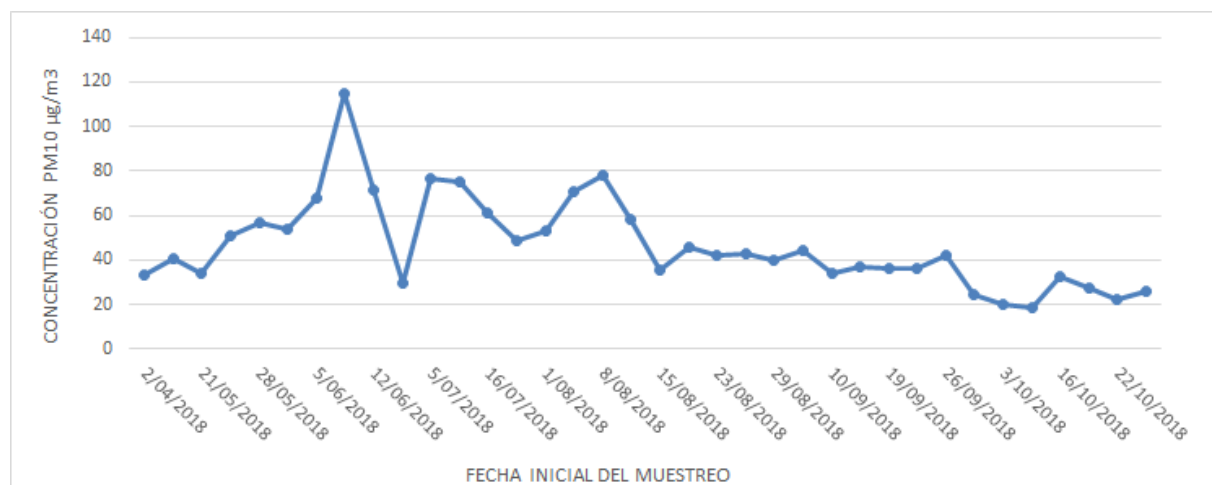


Figura. 9. Grafica del comportamiento de la concentración de PM<sub>10</sub> muestreado con SFU

**Fuente:** Elaboración propia.

En la Figura 9 se observa el grafico del comportamiento de la concentración de PM<sub>10</sub> muestreada por el SFU. La mayor concentración fue observada en el día 07 de junio de 2018 (114,47 µg/m³). Teniendo en cuenta las observaciones suministradas en campo durante el período de muestreo, se registró durante la toma de esta muestra construcciones aledañas, el cielo se mantuvo soleado, así mismo, se observó que los filtros se registraron de un color amarillo. Por otra parte, la menor concentración de PM<sub>10</sub> registrada fue el día 10 de octubre de 2018 (18,27 µg/m³), esta baja concentración está asociada a periodos de lluvia constante días antes, atribuyendo que el arrastre de las partículas a causa de las gotas de lluvia genera la disminución de la concentración de material particulado, además de que los filtros observados presentan un color más tenue que la muestra con mayor concentración.

Los Cambios bruscos observados de la dispersión de las partículas suspendidas y su disolución en la atmósfera están asociadas y condicionada por los factores climáticos, por la geología local, actividades industriales, adicionando la topografía y el aerosol marino impulsado por las corrientes de aire, este fenómeno se alude principalmente a las partículas que provienen de la condensación de vapores, influyendo la alta presión atmosférica, la temperatura y humedad relativa, así como de la propia concentración del vapor de las zonas costeras generando mucho más material grueso (nucleación). (Candanoza, S. et al., 2013)

En la *Tabla 2* se exponen dos casos donde se utilizó el SFU como metodología de investigación. La relación del material particulado con fracción 10 ha sido objeto de estudio en diversas ciudades del mundo. La influencia de la topografía de los lugares es fundamental para la variación de las concentraciones, además los estudios presentan una mayor elevación en su concentración porque al ser megaciudad en potencia existe una mayor fuente de emisiones.

*Tabla 2.*

*Relación PM<sub>10</sub> para diferentes países y ciudades.*

Localización	Concentración ( $\mu\text{g m}^{-3}$ )	Estudios
Estambul, Turquía.	59,58	(Karaca, F. et al., 2009).
Lagos Mega City, Nigeria.	64,50	(Owoade et al., 2013).
Barranquilla, Colombia.	47,20	Estudio propio.

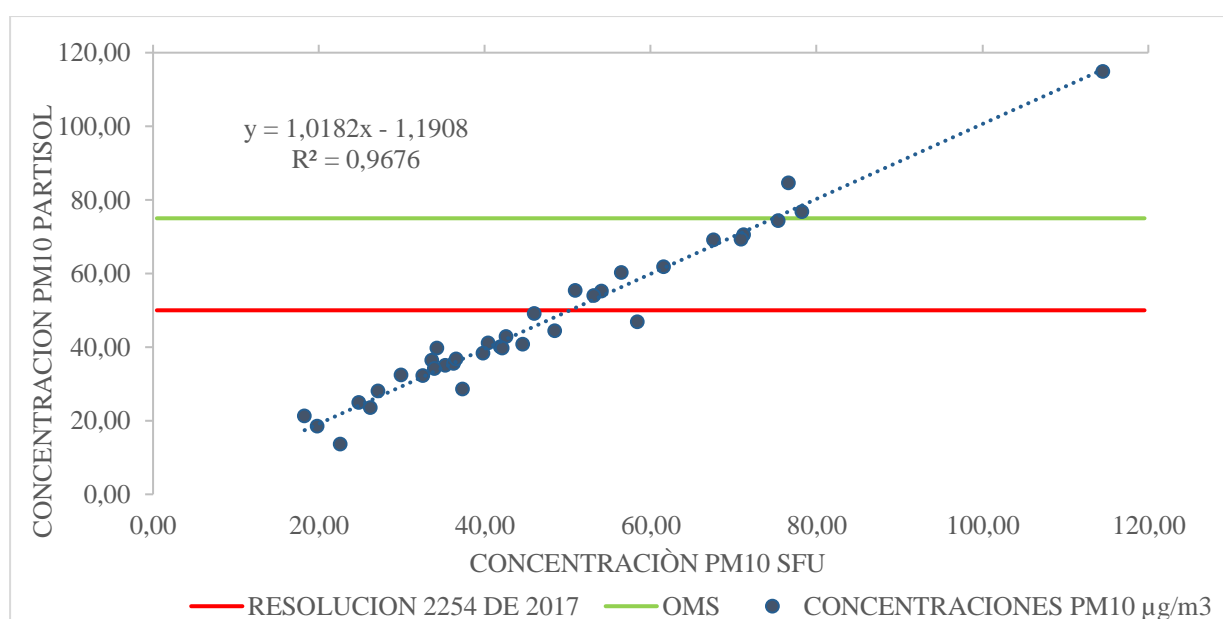
Fuente: Elaboración propia.

Las concentraciones obtenidas en los estudios ejemplificados, tienden a ser más altas que las obtenidas en Barranquilla, puede ser debido a que es mayor la población que alberga en esas ciudades, además, se menciona importantes contribuciones industriales, relacionado con actividades de fuentes antrópicas tanto como móviles, así como la varianza de la meteorología.

En la *Figura 10* están presentadas las concentraciones de PM<sub>10</sub> obtenidas para el período de abril a octubre de 2018. Teniendo en cuenta los puntos de comparación de las dos metodologías, se logra identificar 3 puntos que sobrepasan el valor máximo permisible según la OMS, siendo este valor de 50µg/m<sup>3</sup> con una exposición de 24 h, así mismo, existe un numero de datos registrado que sobrepasan el rango de 75µg/m<sup>3</sup> con una exposición de 24 horas expuesta, reglamentada por la Resolución 2254 de 2017, valor máximo permisible en Colombia.

Cabe resaltar que todos los muestreos de este proyecto se realizaron con una exposición de 48 horas, fundamental para la acumulación de masa de material particulado para la identificación y análisis de la muestra a nivel químico, estudio que se realizará en otra investigación. Las variaciones en las concentraciones de PM<sub>10</sub> pueden darse por influencia de los parámetros meteorológicos y/o diferentes contribuciones de fuentes. (Maenhaut, Francois, & Cafmeyer, 1994)

La correlación de los resultados del SFU y del Partisol mantiene una relación según su varianza. La estimación de  $R^2$  es de 0,9676 mediante la regresión lineal (*Figura 10*), es decir, sus datos siguen una misma tendencia y existe una relación entre sus variables.



*Figura 10. Correlación de las concentraciones de PM<sub>10</sub> para los dos sistemas de muestreo (Stacked Filter Unit x Partisol)*

Al realizar una comparación general de las concentraciones registradas, se observa que se obtuvo un comportamiento muy similar de las concentraciones de partículas entre los dos equipos de muestreo. Por lo tanto, se puede constatar en la gráfica, que para el SFU y el Partisol el muestreo del 07 de junio tuvo la concentración más elevada siendo 114,47 y 114,81  $\mu\text{g}/\text{m}^3$  respectivamente, teniendo un error de 0,3% siendo sus valores muy equivalentes entre los dos equipos. No obstante, se analizó que existe una dispersión muy similar del comportamiento de las concentraciones mediadas por ambos equipos de monitoreo. Sin embargo, durante el monitoreo del día con el porcentaje de error más alto fue el 22 de Octubre el SFU tuvo un error del 40% siendo la concentración del SFU más baja con respecto al Partisol, por lo tanto, sus valores correspondientes fueron 22,58  $\mu\text{g}/\text{m}^3$  del SFU y 13,6  $\mu\text{g}/\text{m}^3$  del PTR.

El muestreador de partícula gruesa (PM<sub>10</sub>) obtuvo un error de 1,74% aplicando la Ec.2 demostrando la efectividad con respecto al Partisol. Resultando que el muestreador brinda las posibilidades técnicas y asequibles para las comunidades que lo requieran, garantizando resultados congruentes, de esta misma forma se afirma que el SFU se brinda como un sistema de control de flujo que es de simple orden para minimizar el costo unitario. (Hopke, P. et al., 1997)

*Tabla 3.*

*Prueba de Normalidad según Kolmogorov-Smirnov y Shapiro-Wilk*

	Pruebas de normalidad					
	Kolmogorov-Smirnov <sup>a</sup>			Shapiro-Wilk		
	Estadístico	gl	Sig.	Estadístico	gl	Sig.
Concentración PM10 SFU	,143	37	,054	,911	37	,006

## a. Corrección de significación de Lilliefors

*Fuente: IBM SPSS Statistics 22.0*

Se comprobó que mediante la prueba de Shapiro – Wilk (Tabla 3) los datos muestran una distribución no normal, esto se debe a que el resultado obtenido es menor al valor p (0,05) siendo su valor de 0,006. Así mismo, se tuvo en cuenta en el desarrollo de la prueba el coeficiente de Shapiro- Wilk debido a que esta se utiliza para muestras con menores de cincuenta datos.

*Tabla 4*

*Correlación entre las concentraciones de PM<sub>10</sub> con las dos y las variables meteorológicas.*

Correlaciones								
	Concentración PM10 SFU	Concentracion PARTISOL PM10	Temperatura	Humedad	Velocidad del viento	Presion Atmosferica	Radiacion Solar	Precipitacion
Concentracion PM10 SFU	1							
Concentracion PARTISOL PM10	,976**	1						
	,000							
Temperatura	,126	,101	1					
	,458	,551						
Humedad	,013	-,034	-,367*	1				
	,937	,842	,026					
Velocidad del viento	,161	,125	,061	,062	1			
	,342	,461	,719	,717				
Presion Atmosferica	-,036	-,065	-,348*	,061	,190	1		
	,833	,701	,035	,721	,261			
Radiacion Solar	,370*	,311	,645**	-,098	,157	-,007	1	
	,024	,061	,000	,565	,353	,968		
Precipitacion	,078	,113	-,137	-,186	-,108	,011	-,289	1
	,646	,506	,418	,271	,523	,948	,083	

\*\* . La correlación es significativa en el nivel 0,01 (2 colas).

\* . La correlación es significativa en el nivel 0,05 (2 colas).

*Fuente: Elaboración propia.*

En la *Tabla 4* se observa la correlación que existe entre las variables meteorológicas y las concentraciones de PM<sub>10</sub> obtenidas por el sistema de muestreo *Stacked Filter Unit* (SFU) y el sistema Partisol (PTR). Esta correlación está basada en la asociación lineal entre las variables. Establecidas por el coeficiente de correlación de Spearman, ya que estas variables no siguen una distribución normal.

Cuando se hace el análisis de las concentraciones del SFU con las del Partisol, se observa una correlación estadísticamente significativa, debido a que el coeficiente de correlación entre estas dos variables nos indica que existe una relación fuerte, acercando su valor a +1, siendo este valor 0,976. Este valor realmente indica una buena linealidad entre ellos, fundamental para la calidad de un muestreador más sostenible y asequible comparado con un equipo validado por la USEPA.

A su vez, la concentración del SFU con respecto a la humedad relativa no tiene una correlación directa debido a que su significancia está superior al valor de referencia 0,05, siendo este valor 0,013. El efecto de las partículas se precipita hacia el suelo, indicando que si la humedad relativa aumenta provoca menor concentración de partículas en el Ambiente. Este fenómeno es provocado porque la humedad relativa es aquella relación entre la cantidad de vapor de agua que contiene y la que tendría si estuviera completamente saturada; así cuanto más se aproxima el valor de la humedad relativa al 100 % más húmedo está y los componentes de los aerosoles absorben vapor de agua, Montoya et 2007.

Del mismo modo, si se analiza la significancia de la velocidad del viento con respecto a la concentración de la partícula gruesa (PM<sub>10</sub>) del SFU se observa que existe una baja significancia, es decir, no existe una alteración directa en el comportamiento de la concentración cuando hay una variación en la velocidad del viento. Esto se debe a que su valor es menor del valor de referencia, siendo 0,0342 su valor. Sin embargo, su correlación es



baja ya que el valor del coeficiente de correlación es 0,161 y no esta tan cercano al valor de referencia que es +1.

La velocidad del viento es importante en el estudio de las concentraciones de partículas, ya que es el factor principal que determina el transporte y dispersión de las partículas, a las diferentes zonas. La baja correlación positiva se debe a que la velocidad del viento puede ser directamente proporcional al material particulado, debido a la resuspensión del material, originado de los aerosoles marino. Este resultado ha sido reportado por diferentes investigadores, así como se afirma en el informe “Análisis y Origen de las Concentraciones de TSP y PM<sub>10</sub> en Minería de Carbón a Cielo Abierto usando Gráficos Polares” la correlación entre la velocidad del viento y la concentración de PM<sub>10</sub> que se obtuvo fue una correlación positiva que varía entre 0,219 a 0,453. (Rojano, R. E., et al., 2018)

A continuación, en las diferentes *Tablas* (5, 6, y 7) se resume el origen de las masas de aire en coordenadas de las diferentes alturas 500m, 1500 m, 2500 m AGL (Sobre el nivel del suelo), de predominancia de los orígenes de masas de aire en la Región Centro- Histórico de Barranquilla. Se estima la frecuencia de las muestras (bar) de presencia de cada uno de los orígenes, con la media de la concentración que predomina en cada coordenada y su respectivo porcentaje.

Partiendo de la información anterior, se tiene que la capa limite es influenciada por gran parte de las emisiones antropogénicas por consiguiente la altura de 500 m se eligió con el fin de tener una referencia dentro de esta capa. De este modo, las alturas de 1500 m y 2500 m se seleccionaron con el fin de analizar el comportamiento de las masas de aire en la zona superior de la capa límite y en la tropósfera libre. Por otra parte, la duración de los cálculos de dos días se escogió teniendo en cuenta la duración de muestreo y así mismo permitir analizar y conocer el desplazamiento de las masas de aire con su origen.

Tabla 5.

*Origen de masas de aire en Región Centro – Histórico de Barranquilla a 500 m AGL durante el muestreo*

Coordenadas	Frecuencia	Concentración media PM <sub>10</sub> SFU [ $\mu\text{g}/\text{m}^3$ ]	Concentración media PM <sub>10</sub> PRT [ $\mu\text{g}/\text{m}^3$ ]	Origen
E	8	50,05	48,42	La guajira, golfo de Venezuela y mar caribe.
ENE	19	48,14	48,70	Mar caribe e islas del caribe (como Bahamas, la florida y Yucatán)
NE	6	45,40	41,90	Mar caribe e islas del caribe (como Bahamas, la florida y Yucatán)
SSE	1	37,31	28,64	Masas provenientes de departamentos como Bolívar, Magdalena y/o el centro de la región caribe colombiana
ESE	2	36,91	36,87	Masas de aire provenientes de México
SO	1	18,27	21,32	Masas provenientes del Océano pacifico
<b>TOTAL</b>	<b>37</b>			

*Fuente: Elaboración propia.*

En la *Tabla 5* se expone las trayectorias de origen que están asociadas a unas corrientes en la cual se tiene niveles en contribución más frecuente de 50,05  $\mu\text{g}/\text{m}^3$  para el SFU y así mismo para el Partisol una concentración de 48,42  $\mu\text{g}/\text{m}^3$  en la que se infieren que su mayor procedencia es del mar Caribe la altura 500 m AGL, así mismo se infiere que la menor concentración promedio provino del Océano Pacifico, siendo su valor promedio de 18,27  $\mu\text{g}/\text{m}^3$ .

De los resultados obtenidos se puede observar que para la altura de 500 m AGL el origen de las masas de aire que predomina es al ENE (51,35%) proviniendo las partículas del Mar Caribe e islas del caribe (como Bahamas, la florida y yucatan), seguido por E (21,62%) y NE (16,22%) viniendo de la Guajira, Golfo de Venezuela, respectivamente. En menor medida se encuentran los orígenes ESE (5,41%), SSE (2,70%) y SO (2,70%).

Tabla 6.

*Origen de masas de aire en Región Centro – Histórico de Barranquilla a 1500 m AGL durante el muestreo*

Coordenadas	Frecuencia	Concentración media PM <sub>10</sub> SFU [µg/m <sup>3</sup> ]	Concentración media PM <sub>10</sub> PRT [µg/m <sup>3</sup> ]	Origen
NE	2	29,98	30,01	Mar Caribe e islas del caribe (como Bahamas, la florida, Yucatán.)
ENE	8	36,86	36,38	Masas provenientes del departamento Magdalena, la guajira y Mar Caribe.
E	10	56,75	57,84	La Guajira, Golfo de Venezuela y el Mar Caribe
ESE	9	49,99	47,41	Masas de aire provenientes de México.
SE	4	49,76	48,89	Masas provenientes de países de Brasil.
SSE	1	58,40	46,88	Masas provenientes de países como Perú, Bolivia, y Paraguay.
S	1	33,89	34,22	Masas provenientes de departamentos como Bolívar, Magdalena y/o el centro de la región caribe colombiana
OSO	2	26,71	27,43	Masas provenientes de Océano pacifico.
<b>TOTAL</b>	<b>37</b>			

*Fuente: Elaboración propia.*

En la *Tabla 6* se observa que el origen de las partículas relacionadas con La guajira, el golfo de Venezuela y del océano Atlántico al Este prevalece con un mayor promedio de concentración para el SFU y tiene como concentración frecuente 56,75 µg/m<sup>3</sup> y por consiguiente para el Partisol tuvo una concentración promedio de 57,84 µg/m<sup>3</sup> a una altura de 1500 m AGL, de igual forma se registró hacia el sur una menor procedencia, siendo su concentración promedio de 27,03 µg/m<sup>3</sup> para el SFU y respectivamente 27,43 µg/m<sup>3</sup> para el Partisol.

Para la altura de 1500 m AGL los resultados obtenidos se puede observar que la mayor frecuencia es hacia el Este (27,03%) predominando las masas de aire provenientes de

La guajira, Golfo de Venezuela y el Mar Caribe, seguido por ESE (24,32%) masas de aire provenientes de México y ENE (21,62%) que provienen de los departamentos como el Magdalena, la guajira y Mar Caribe. Así mismo, los orígenes con un porcentaje de frecuencia de menor predominancia son SE (10,81%), SSE (2,70%), S (2,70%) y OSO (5,41%).

*Tabla 7.*

*Origen de masas de aire en Región Centro – Histórico de Barranquilla a 2500 m AGL durante el muestreo*

Coordenadas	Frecuencia	Concentración media PM <sub>10</sub> SFU [µg/m <sup>3</sup> ]	Concentración media PM <sub>10</sub> PRT [µg/m <sup>3</sup> ]	Origen
ENE	12	37,012	35,21	Masas provenientes del departamento Magdalena. La Guajira y Mar Caribe.
E	11	61,91	60,95	La Guajira, Golfo de Venezuela y el Mar Caribe.
ESE	5	45,56	45,59	Masas de aire provenientes de México.
SE	4	52,03	54,30	Masas provenientes de Brasil.
S	3	27,30	24,00	Masas provenientes de departamentos como Bolívar, Magdalena y/o el centro de la región caribe colombiana
O	1	40,39	41,1	Masas provenientes del mar Caribe.
ONO	1	33,61	36,4	Masas provenientes del mar Caribe.
<b>TOTAL</b>	<b>37</b>			

*Fuente: Elaboración propia.*

En mayor medida de incidencia para la masa en la altura correspondiente 2500 m AGL se tiene en promedio una concentración de 37,012 µg/m<sup>3</sup> registro del SFU y para el PRT 35,21 µg/m<sup>3</sup> provenientes de áreas continentales.

De igual forma, se observa en la *Tabla 7* que las masas de aire con mayor predominancia vienen del este E (30%) siendo su altura de 2500 m AGL, por lo cual sus masas de aire provienen del golfo de Venezuela y el Mar Caribe, seguidamente se observan orígenes provenientes del SE (11%), ESE (14%) y ENE (32%). En menor medida se encuentran los orígenes S (8%), O (3%) y ONO (3%)

Los análisis preliminares tienen preeminencia a la hora de examinar las contribuciones de material particulado transportado a largas distancias por las masas de aire, lo cual afecta en la calidad del aire de la ciudad.

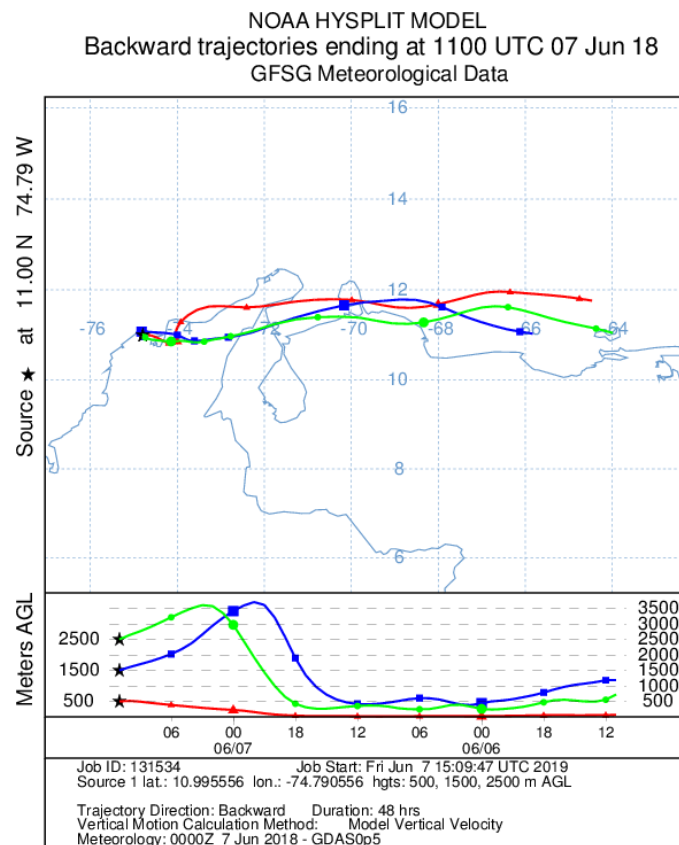


Figura 11. Trayectoria del 07 de junio del 2018

**Fuente:** NOAA HYSPLIT MODEL.

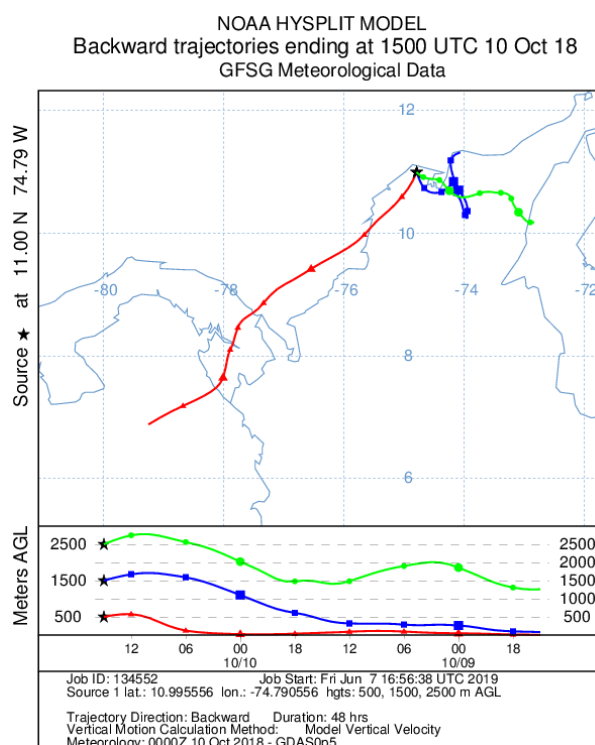


Figura 12. Trayectoria del 10 de octubre del 2018

**Fuente:** NOAA HYSPLIT MODEL.

Las anteriores trayectorias *Figura 11* y *12* se analizaron, por su significativo registro en la concentración, siendo la trayectoria del 07 de junio la concentración más alta registrada en el muestreo y la del 10 de octubre la más baja concentración registrada.

Para la trayectoria del 07 de junio, la masa de aire a una altura de 500 m AGL tiene un punto de origen del Océano Atlántico hacia el Este de Colombia, así mismo, esta bordea la Isla los Roques, llegando al Estado Falcón, de Venezuela y en su recorrido de 48 h la masa de aire llega a la zona de muestro por las corrientes de aire provenientes de la Guajira, tocando Santa Marta. Por otro lado, el comportamiento de la masa de aire en su trayectoria a una altura de 2500 m AGL es muy parecido a la de 500 m AGL, siendo que su masa de aire proviene más hacia la zona costera de Caracas Venezuela.

Para una altura de 1500 m AGL la masa de aire tiene como origen las Islas Margaritas, cruzando por el Golfo de Venezuela, Este de Colombia y proviniendo las corrientes de aire más hacia el norte de la guajira en comparación de las demás, tocando gran

parte del departamento del Magdalena, este fenómeno ocurre debido a que la costa Caribe Colombiana cubre un amplio rango latitudinal dependiente directamente de los vientos alisios y las oscilaciones de la Zona de Convergencia Intertropical, impactando gran parte del límite de Panamá y la alta Guajira. (Vernette, G., 1985)

Así mismo, para el análisis de la trayectoria de la masa de aire del día 10 de octubre para una altura de 500 m AGL provienen del Océano Pacífico, por otro lado, el comportamiento en las alturas de 1500 y 2500 m AGL provienen de la zona costera de la ciudad de Santa Marta y zona boscosa de Zulia, Venezuela, respectivamente.

Todo esto, con el fin de analizar las contribuciones en sus diferentes alturas (500, 1500 y 2500 m) afirmando que ninguna de las contribuciones genera transporte de material particulado a larga distancia, es decir, todas las fuentes de PM<sub>10</sub> registrada son a partir de contribución local información que se evidencia en el anexo 3, por ende, se es necesario realizar una caracterización química de las muestras para poder garantizar con certeza cuales son las posibles fuentes.

## 7. Conclusiones

En el presente estudio, se determinó la concentración de partículas durante el período de abril a octubre de 2018 en Norte-Centro histórico la ciudad de Barranquilla-Colombia, donde el material particulado PM<sub>10</sub> fue registrado por la metodología con Stacked Filter Unit (SFU) arrojó un promedio de 46,40  $\mu\text{g}/\text{m}^3$  en las 37 muestras recolectadas, presentando el máximo valor de 114,47  $\mu\text{g}/\text{m}^3$  en junio y para el mes de octubre una concentración mínima de 18,27  $\mu\text{g}/\text{m}^3$ , atribuyéndole esto a las condiciones meteorológicas que tuvo la zona para las fechas, donde se presentaron tiempos de verano y lluvias influyendo en las concentraciones.

Es importante destacar que las metodologías usadas *Stacked Filter Unit* siendo el instrumento principal de este estudio y en comparación con el muestreador dicotómico de partículas, aportaron gran similitud en las concentraciones lo cual es beneficioso en la forma de medición dándole credibilidad a la metodología primeramente presentada, donde se vislumbra que ninguna de las contribuciones genera transporte de material particulado a larga distancia por el análisis realizado con el hysplit información que se evidencia en el anexo 3, es decir, todas las fuentes de PM<sub>10</sub> registrada son a partir de contribución local o cercanas a la localización del presente estudio.



## 8. Recomendaciones

Complementar el sistema de vigilancia de calidad de aire, el cual utilice la metodología *Stacked Filter Unit* (SFU), en diferentes puntos de la ciudad para tener una investigación en la zona.

Se recomienda monitorear de forma constante durante época sea de sequía o lluvia, en mejor medida un año donde se pueda evidenciar las dos temporadas observando mejor el comportamiento, las tendencias de las masas, su influencia en la zona y la repercusión en su próximo punto.

Se recomienda hacer una caracterización química de las partículas, con la finalidad de determinar las concentraciones por tipos de contaminantes ocasionados por la actividad del transporte de las masas de aire encontradas.

## 9. Referencias

- Adriano Villa, E. del rocío. (2016). Sistema de extracción de material particulado en la construcción del hospital regional docente Ambato. (Universidad nacional de chimborazo). Retrieved from <http://dspace.unach.edu.ec/handle/51000/3115>
- Alvarado Zuñiga, G. M. (2010). Estudio integrado de factores que influyen sobre la contaminación atmosférica por material particulado respirable de pudahuel (Universidad de Chile). Retrieved from <http://mgpa.forestaluchile.cl/Tesis/Alvarado, Gerardo.pdf>
- Amdur, M. O. (1969). Toxicologic Appraisal of Particulate Matter, Oxides of Sulfur, and Sulfuric Acid. *Journal of the Air Pollution Control Association*, 19(9), 638–646. <https://doi.org/10.1080/00022470.1969.10466535>
- Angulo, R. (2008). Medición y Evaluación de la calidad del aire en los sectores de Fertisa y Trinitaria de la ciudad de Guayaquil debido a la presencia de material particulado menor a 10 y 2.5  $\mu\text{m}$ . *Escuela Superior Politécnica del Litoral. Guayaquil, EC*.
- Arciniegas, C. (2012). Diagnóstico y control de material particulado: partículas suspendidas totales y fracción respirable PM<sub>10</sub>. *Revista Luna Azul*, 34, 195-213.
- Arrieta Fuentes, A. J. (2016). Dispersión de material particulado (pm<sub>10</sub>), con interrelación de factores meteorológicos y topográficos. *Ingeniería Investigación y Desarrollo*, 16(2). <https://doi.org/10.19053/1900771x.v16.n2.2016.5445>
- Artiñano, B., Salvador, P., Alonso, D., Querol, X., y Alastuey, A. (2003). Anthropogenic and natural influence on the PM<sub>10</sub> and PM<sub>2.5</sub> aerosol in Madrid (Spain). Analysis of high concentration episodes. *Environmental Pollution*, 125, 453-465.
- Bayas Guerrero, K. A. (2017). “Distribución espacial y multitemporal de material particulado, en los Campus Universitarios de la Unach de la ciudad de Riobamba.” In (Bachelor’s thesis, Universidad Nacional de Chimborazo, 2017). Retrieved from <http://dspace.unach.edu.ec/handle/51000/4117>
- Bedoya, J., & Martínez, E. (2009). Antioquia-Colombia air quality in the aburrá valley Antioquia-Colombia. *Año*, 76, 7–15.

- Brusseau, M., Matthias, A., Comrie, A., & Musil, S. (2019). *Ciencias Ambientales y de la Contaminación*. Academic Press
- Calua Carrasco, C. E. R. (2018). Concentración de contaminantes sólidos sedimentables para el periodo mayo - junio 2017 en el entorno de la upn y su relación con las normas de la oms (Universidad Privada del Norte). Retrieved from [http://refi.upnorte.edu.pe/bitstream/handle/11537/14073/Calua Carrasco Carlos Elder Rudecindo.pdf?sequence=1&isAllowed=y](http://refi.upnorte.edu.pe/bitstream/handle/11537/14073/Calua%20Carrasco%20Carlos%20Elder%20Rudecindo.pdf?sequence=1&isAllowed=y)
- Chen, B., Stein, A. F., Maldonado, P. G., Sánchez de la Campa, A. M., González-Castanedo, Y., Castell, N., & de la Rosa, J. D. (2013). Size distribution and concentrations of heavy metals in atmospheric aerosols originating from industrial emissions as predicted by the HYSPLIT model. *Atmospheric Environment*, 71, 234–244. <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2013.02.013>
- Candanoza, S., Goribar, L., & García, F. (2013). Relación Partículas Respirables (Pm)/Partículas Suspendidas Totales (Pst) En Santa Marta (Colombia) 10. *Dyna*, 80(179), 157-164.
- Contreras Carrillo, E. (2012). Evaluación de los efectos en salud relacionados con la contaminación del aire para el sector ciudadela norte de la ciudad de Ocaña, norte de Santander (Universidad Francisco de Paula Santander Ocaña). Retrieved from <http://repositorio.ufpso.edu.co:8080/dspaceufpso/bitstream/123456789/1140/1/28724.pdf>
- Corte, D., Sierra, F., & Valencia, G. (2015). Validación del modelo matemático “Función de densidad de probabilidad (pdf) de Weibull”, evaluando el recurso eólico en la zona del caribe colombiano: caso estudio. *Prospectiva*. <https://doi.org/10.15665/rp.v13i2.485>
- Cuesta, O. et al., (2014) Diagnóstico del medio ambiente atmosférico producto de las principales fuentes fijas de la Ciudad de la Habana. Informe científico técnico. INSMET. La Habana, Cuba. 192pp.
- Doria Oviedo, R., & Porras Barrios, T. (2017a). Distribución Temporal de la Fracción Respirable PM<sub>10</sub> y la Correlación con las Variables meteorológicas en la universidad de la costa CUC (Universidad de la costa CUC). Retrieved from

file:///C:/Users/compaq/Downloads/Distribucion temporal de la fracción respirable pm 10 y la correlación con las variables meteorológicas en la universidad de la costa CUC.pdf

Durán Lombana, J. J., & Moscoso Culma, L. A. (2018). Análisis correlacional de datos de MP10 y partículas sedimentables, su composición fisicoquímica y mineralógica, en la zona norte de la ciudad de Bogotá. Retrieved from <http://repository.lasalle.edu.co/handle/10185/28369#.XJQ1HSugwyI.mendeley>

Echeverri Londoño, C. A., & Maya Vasco, G. J. (2008). Relación Entre las partículas finas (pm2.5) y respirables (pm10) en la ciudad de Medellín (Vol. 12).

EPA of the United States. Integrated Science Assessment (ISA) for Particulate Matter (Final Report, December 2009). United States Environmental Protection Agency, Washington, DC, EPA / 600 / R-08 / 139F, 2009. Estévez García, J. A. (2010).

Exposición laboral a contaminación atmosférica: material particulado y efectos respiratorios en la salud de policías de tránsito de Bogotá, Colombia 2008-2009 (Universidad Nacional de Colombia). Retrieved from <http://bdigital.unal.edu.co/2662/1/597591.2010.pdf>

Ezeh, GC, Obioh, IB, Asubiojo, OI y Abiye, OE (2012). PIXE characterization of PM10 and PM2. 5 particle sizes collected in Ikoyi Lagos, Nigeria. *Toxicological & Environmental Chemistry* , 94 (5), 884-894.

Fuentes, A. (2016). interrelation of meteorological and topographic factors (Particulate Matter Dispersion ( PM 10 ), with interrelation of topographic and meteorological factors ). 16, 43–54.

García Lozada, H. M. (2006a). Tipología de las fuentes de emisiones de partículas. In Evaluación del riesgo por emisiones de partículas en fuentes estacionarias de combustión. Estudio de caso: Bogotá (p. 4). Retrieved from [https://books.google.com.co/books?id=T87uEuVP84kC&dq=fuentes+naturales+y+antropogenicas+de+material+particulado&hl=es&source=gbs\\_navlinks\\_s](https://books.google.com.co/books?id=T87uEuVP84kC&dq=fuentes+naturales+y+antropogenicas+de+material+particulado&hl=es&source=gbs_navlinks_s)

García Lozada, H. M. (2006b). Tipologías de las fuentes de emisión de partículas. In Evaluación del riesgo por emisiones de partículas en fuentes estacionarias de combustión. Estudio de caso: Bogotá (p. 7). Retrieved from

<https://books.google.com.co/books?id=T87uEuVP84kC&printsec=frontcover&hl=es#v=onepage&q&f=false>

- García R, F. F., Agudelo G, R. A., & Jiménez J, K. M. (2006). Distribución espacial y temporal de la concentración de material particulado en Santa Marta, Colombia. *Rev. Fac. Nac. Salud Pública*, 24(2), 73–82.
- Garrillo, E. (2010). Evolución y tendencia espacio -temporal de las concentraciones de material particulado pm10 considerando la influencia de los parámetros meteorológicos.
- Gómez Parada, L. A. (2001). Comportamiento espacial y Temporal de los Contaminantes Atmosféricos Medidos por la Red de Monitoreo de Calidad del Aire de Santiago (Universidad de Chile). <https://doi.org/10.13140/RG.2.2.10638.15688>
- Harber, P., Barnhart, S., Boehlecke, B., Beckett, W., Gerrity, T., McDiarmid, M., ... Utell, M. (1996). Respiratory protection guidelines. This official statement of the American Thoracic Society was adopted by the ATS Board of Directors, March 1996. 154 (4 Pt 1): 1153-65. <https://doi.org/10.1164 / ajrccm.154.4.8887621>
- Henríquez, m; (2012). climatología ambiental de colombia: ediciones usta.
- Hernández-Ceballos, M. A., H. García-Mozo, J. A. Adame, E. Domínguez-Vilches, J. P. Bolívar, B. A. De la Morena, R. Pérez-Badía, and C. Galán. 2011. Determination of potential sources of Quercus airborne pollen in Cordoba city (southern Spain) using back-trajectory analysis. *Aerobiologia* 27: 261-276.
- Hopke, P. K., Xie, Y., Raunemaa, T., Biegalski, S., Landsberger, S., Maenhaut, W., ... & Cohen, D. (1997). Characterization of the Gent stacked filter unit PM10 sampler. *Aerosol Science and Technology*, 27(6), 726-735.
- Jaenicke, R. (1980). Atmospheric aerosols and global climate. *Journal of Aerosol Science*, 11(5–6), 577–588. [https://doi.org/10.1016/0021-8502\(80\)90131-7](https://doi.org/10.1016/0021-8502(80)90131-7)
- Koçak, M., Mihalopoulos, N., & Kubilay, N. (2007). Contributions of natural sources to high PM10 and PM2. 5 events in the eastern Mediterranean. *Atmospheric Environment*, 41(18), 3806-3818.

Montoya et al. INEGI; Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática, (2007). 1er Informe de la calidad del Aire, México Tabasco.

Maenhaut, W., Francois, F., Cafmeyer, J., & Okunade, O. (1995). Atmospheric aerosol studies using the 'Gent' stacked filter unit and other aerosol collectors, with multi-elemental analysis of the samples by nuclear-related analytical techniques. Appendix 4 (No. NAHRES--26)

Mateo, M. M. (2015). Evaluación de efectos agudos en la función pulmonar por exposición a material particulado fino (pm 2.5) en niños que viven próximos a una playa masivamente contaminada con relaves mineros, Chañaral, Chile.

Matus C., P., & Lucero CH., R. (2002). Norma Primaria de calidad del aire. Revista Chilena de Enfermedades Respiratorias, 18(2), 112–122. <https://doi.org/10.4067/S0717-73482002000200006>

MiniAmbiente. (2019). MiniAmbiente. Obtenido de Contaminación Atmosférica: <http://www.minambiente.gov.co/index.php/asuntos-ambientales-sectorial-y-urbana/gestion-del-aire/contaminacion-atmosferica>,

Moreno, S., Alcalde, R., Distrital, S., Directivos, A., Antonio, J., Escalante, N., ... Osorio, B. (2010). Plan Decenal de Descontaminación del Aire para Bogotá. Retrieved from [http://ambientebogota.gov.co/en/c/document\\_library/get\\_file?uuid=b5f3e23f-9c5f-40ef-912a-51a5822da320&groupId=55886](http://ambientebogota.gov.co/en/c/document_library/get_file?uuid=b5f3e23f-9c5f-40ef-912a-51a5822da320&groupId=55886)

MAVDT. (2010). Protocolo para el monitoreo y seguimiento de la calidad del aire. Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial, Colombia.

Levy, J., Spengler, J.D., Hlinka, D., Sullivan, D., Moon, D.. (2002). Using CALPUFF to evaluate the impacts of power plant emissions in Illinois: model sensitivity and implications, Atmospheric Environment, Volume 36, Issue 6, February 2002, Pages 1063-1075.

Ordoñez-Sánchez, Y. C., Reinos-Valladares, M., Hernández-Garcés, A., & Canciano-Fernández, J. (2018). Aplicación de modelos simplificados para la dispersión de contaminantes atmosféricos. Caso de estudio. *Revista Cubana de Química*, 30(1), 90-103.

- OMS. (2005). Organización mundial de la salud. Recuperado el 13 de 03 de 2019, de Guías de calidad del aire de la OMS relativas al material particulado, el ozono, el dióxido de nitrógeno y el dióxido de azufre: [https://apps.who.int/iris/bitstream/handle/10665/69478/WHO\\_SDE\\_PHE\\_OEH\\_06.02\\_spa.pdf?sequence=1](https://apps.who.int/iris/bitstream/handle/10665/69478/WHO_SDE_PHE_OEH_06.02_spa.pdf?sequence=1)
- Organización Mundial de la Salud. (2018, mayo). Calidad del aire y salud: Datos y cifras. Recuperado de [https://www.who.int/es/news-room/fact-sheets/detail/ambient-\(outdoor\)-air-quality-and-health](https://www.who.int/es/news-room/fact-sheets/detail/ambient-(outdoor)-air-quality-and-health)
- Pachón, J. E., & Sarmiento Vela, H. (2008). Análisis espacio-temporal de la concentración de metales pesados en la localidad de Puente Aranda de Bogotá-Colombia. In Rev. Fac. Ing. Univ. Antioquia N.º (Vol. 43).
- Peralta Quispe, J. L. (2017). Determinación del nivel de riesgo de la calidad de aire por material particulado PM<sub>10</sub> en los 5 sectores del distrito de Morales - San Martín 2017 (Universidad Peruana Unión ). Retrieved from [http://repositorio.upeu.edu.pe/bitstream/handle/UPEU/1188/Jorge\\_tesis\\_Titulo\\_2017.pdf?sequence=5&isAllowed=y](http://repositorio.upeu.edu.pe/bitstream/handle/UPEU/1188/Jorge_tesis_Titulo_2017.pdf?sequence=5&isAllowed=y)
- Perrone, M. R., Vecchi, R., Romano, S., Becagli, S., Traversi, R., & Paladini, F. (2019). Weekly cycle assessment of PM mass concentrations and sources, and impacts on temperature and wind speed in Southern Italy. *Atmospheric Research*, 218, 129–144. <https://doi.org/10.1016/j.atmosres.2018.11.013>
- Pineda Ballesteros, D. Y., & Álvarez Rodríguez, S. J. (2015). Evaluación del comportamiento de las concentraciones de pm 10 con relación a variables meteorológicas en tres sedes de la universidad distrital (Universidad Distrital Francisco José de Caldas). Retrieved from <http://hdl.handle.net/11349/4711>
- Piñera, I., Pérez, G., Aldape, F., Flores, J., Molina, E., Ramos, M., ... Guibert, R. (n.d.). Estudio de Partículas Finas de la Atmósfera en Centro Habana.
- Préndez, M., & Calderón, V. (2013). Análisis de contaminantes en la cuenca del río aconcagua en Chile. Evaluación de riesgo humano y ambiental (Universidad de Chile). <https://doi.org/10.4067/S0718-07642013000100002>

- Ramírez, O., Sánchez de la Campa, A. M., Amato, F., Catacolí, R. A., Rojas, N. Y., & de la Rosa, J. (2018). Chemical composition and source apportionment of PM<sub>10</sub> at an urban background site in a high-altitude Latin American megacity (Bogota, Colombia). *Environmental Pollution*, 233, 142–155. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2017.10.045>
- Regalado Contreras, A. D. (2015). Caracterización del material particulado del aire ambiente en la ciudad de Loja (universidad nacional de Loja). Retrieved from [http://dspace.unl.edu.ec/jspui/bitstream/123456789/11108/1/Tesis Anabel Regalado\\_Lista.pdf](http://dspace.unl.edu.ec/jspui/bitstream/123456789/11108/1/Tesis%20Anabel%20Regalado_Lista.pdf)
- Robayo-Avendaño, A., & Galindo-Mendoza, M. G. (2014). Análisis de la probabilidad de dispersión de polen de maíz genéticamente modificado usando el modelo HYSPLIT. *Agrociencia*, 48(5), 511-523.
- Rojano, R. E., Arregoces, H. A., Angulo, L. C., & Restrepo, G. M. (2018). Análisis y Origen de las Concentraciones de TSP y PM<sub>10</sub> en Minería de Carbón a Cielo Abierto usando Gráficos Polares. *Información tecnológica*, 29(6), 131-142.
- Rugeles Ahumada, S. R., & Silva Tibabija, A. S. (2017). Estimación de la contribución de las fuentes emisoras de material particulado pm<sub>10</sub> empleando modelos receptores en la zona atmosférica de la universidad de la costa cuc. (Universidad de la costa. ). Retrieved from [http://repositorio.cuc.edu.co/bitstream/handle/11323/342/1044429575 - 1140871213.pdf?sequence=1&isAllowed=y](http://repositorio.cuc.edu.co/bitstream/handle/11323/342/1044429575-1140871213.pdf?sequence=1&isAllowed=y)
- Salomon Salomon, A. V. aleria. (2016). Máster en Salud Pública Especialidad en Medicina Preventiva Escuela Nacional de Sanidad Instituto de Salud Carlos III Efecto a corto plazo del material particulado ( PM<sub>2.5</sub> y PM<sub>10</sub> ) sobre la mortalidad diaria en España. In masterThesis. Retrieved from <http://repositorio.educacionsuperior.gob.ec/handle/28000/4179>
- Salinas Vio, P. A. (2012). Contaminación atmosférica por material particulado y consultas de urgencias por mornilidad respiratoria en menores de 5 años en la ciudad de Valdivia, período mayo-julio, año 2010. Universidad Austral de Chile.
- Scire, J. S., Strimaitis, D. G., & Yamartino, R. J. (2000). A user's guide for the CALPUFF dispersion model. *Earth Tech, Inc. Concord, MA, 10*.



- SIAC. (2010). Manual de diseño de sistemas de vigilancia de la calidad del aire. Retrieved August 21, 2018, from [http://www.minambiente.gov.co/images/AsuntosambientalesySectorialyUrbana/pdf/aire/res\\_2154\\_021110\\_manual\\_operacio.pdf](http://www.minambiente.gov.co/images/AsuntosambientalesySectorialyUrbana/pdf/aire/res_2154_021110_manual_operacio.pdf)
- Valdivia, S. A. P. (2016). Analisis Temporal Y Espacial De La Calidad Del Aire Determinado Por Material Particulado Pm 10 Y Pm 2 , 5 En Lima Metropolitana. *Anales Científicos*, 77(2), 273–283. <https://doi.org/10.21704/ac.v77i2.699>
- Vernette, G. 1985. La plata-forme continentale Caraïbe du Colombie (du débouché du Magdalena au golfe de Morrosquillo)
- Vicéns Moltó, J. L. (2016). Limitaciones de los modelos Gaussianos y dificultades de la CFD en la docencia de la simulación de la dispersión de especies en la atmósfera.
- Vidal Ros, I., López Lee, R., Cuesta Santos, O. A., Bolufé Torres, J., & García Valdés, E. (2018). Condiciones meteorológicas que influyen en las inmisiones de contaminantes atmosféricos en dos localidades de La Habana Meteorological conditions that influence the immissions of air pollutants in two localities of Havana. In *Revista Cubana de Meteorología* (Vol. 24). Retrieved from <http://rcm.insmet.cu/index.php/rcm/article/view/421/482>
- Vivar Martínez, E. F. (2014). cuantificación de material particulado pm10 y su efecto toxicológico-ambiental, en la ciudad de azogues (Universidad de cuenca). Retrieved from [file:///C:/Users/pc/Downloads/cuantificacion de material particulado pm 10 y su efecto toxicologico a,biental, en la ciudad de azogues..pdf](file:///C:/Users/pc/Downloads/cuantificacion%20de%20material%20particulado%20pm%2010%20y%20su%20efecto%20toxicologico%20a,biental,%20en%20la%20ciudad%20de%20azogues..pdf)
- Yuquilema Vilema, R. C. (2018). Material particulado en el área de empaque de harina en industrias molineras y su relación con la afectación a la salud de los trabajadores. Universidad Técnica de Ambato. Facultad de Ingeniería En Sistemas, Electrónica e Industrial. Maestría En Seguridad e Higiene Industrial y Ambiental. Retrieved from <http://repositorio.uta.edu.ec/jspui/handle/123456789/28493>
- Zamarreño, R. A., Gonzalez, P. N., Hanshing, E. X., Amar, G. A., & Pizarro, C. M. (2013). Evaluación del riesgo ambiental por la presencia de mercurio en relaves mineros dentro de la ciudad de andacollo, Chile. *Avances En Ciencias e Ingeniería*, 4(4), 75–83.

Retrieved from

<http://search.ebscohost.com/login.aspx?direct=true&db=fap&AN=95009271&lang=es>

Zhang, Z. H., Hu, M. G., Ren, J., Zhang, Z. Y., Christakos, G., & Wang, J. F. (2017).

Probabilistic assessment of high concentrations of particulate matter (PM 10 ) in Beijing, China. *Atmospheric Pollution Research*, 8(6), 1143–1150.


<https://doi.org/10.1016/j.apr.2017.04.006>

Zurrita, A. A., Badii, M. H., Guillen, A., Lugo Serrato, O. L., & Aguilar Garnica, J. J. (2015).

Factores Causantes de Degradación Ambiental. *Daena: International Journal of Good Conscience*, 10(3), 1-9.

**10. Anexo.***Anexo 1. Formato de muestreo*

FORMATO DE MUESTREO

  
UNIVERSIDAD  
DE LA COSTA

Nombre de la estación

Nombre \_\_\_\_\_ Cargo \_\_\_\_\_

Toma de datos inicial

Fecha

Hora

Flujo inicial

Datos de totalizador

Observaciones

Toma de datos final

Fecha

Hora

Flujo final

Dato de totalizador

Observaciones

Nombre \_\_\_\_\_ Cargo \_\_\_\_\_

*Anexo 2. Tabla de Concentraciones de Material Particulado de 10 micras*

<b>Fecha de Inicio</b>	<b>Concentración PM<sub>10</sub> µg/m<sup>3</sup>SFU</b>	<b>Concentración PM<sub>10</sub> µg/m<sup>3</sup>PRT</b>
02/04/2018	33,61	36,4
04/04/2018	40,39	41,1
21/05/2018	34,24	39,66
23/05/2018	50,87	55,3
28/05/2018	56,47	60,19
30/05/2018	54,02	55,27
05/06/2018	67,56	69,1
07/06/2018	114,47	114,81
12/06/2018	71,22	70,47
20/06/2018	29,91	32,41
25/06/2018	26,48	74,19
03/07/2018	27,31	56,47
05/07/2018	76,63	84,53
09/07/2018	25,85	50,14
11/07/2018	75,33	74,33
16/07/2018	61,53	61,9
23/07/2018	20,61	48,03
25/07/2018	34,17	55,25
30/07/2018	48,39	44,44
01/08/2018	53,10	54,07
06/08/2018	70,89	69,31
08/08/2018	78,26	76,8
13/08/2018	58,40	46,88
15/08/2018	35,19	35,11
21/08/2018	45,92	49,07
23/08/2018	41,90	40,14
27/08/2018	42,57	42,92
29/08/2018	39,81	38,3
03/09/2018	44,58	40,71
10/09/2018	33,89	34,22
12/09/2018	34,41	17,36
17/09/2018	37,31	28,64
19/09/2018	36,20	35,55
24/09/2018	36,54	36,7
26/09/2018	42,08	39,72
01/10/2018	24,78	24,91
03/10/2018	19,80	18,46
10/10/2018	18,27	21,32
16/10/2018	32,49	32,31
18/10/2018	27,13	28,02
22/10/2018	22,58	13,6
24/10/2018	26,20	23,61